



国际电气工程先进技术译丛

WILEY



IEEE

气体绝缘输电线路

Gas-Insulated Transmission Lines

[德] 赫曼·科赫 (Hermann Koch) 著

沈威 杨思民 杨建军 译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



本书内容

气体绝缘输电线路（GIL）是成熟的高电压输电技术，特别是在环境或结构对架空线有限制时非常合适。本书通过对GIL技术、经济和环境的影响以及电力系统应用方面的分析，对该技术的物理设计、特性以及优点提供了完整的认识。作者对GIL如何在规划阶段成为最佳解决方案，以及如何应用在电力系统中作了阐述。



国际电气工程先进技术译丛

气体绝缘输电线路

Gas – Insulated Transmission Lines

[德] 赫曼·科赫 (Hermann Koch) 著

沈 威 杨思民 杨建军 译



机械工业出版社

气体绝缘输电线路(GIL)通常用于如水电站和核电站以及其他场所的大容量输电。本书通过对 GIL 技术、经济 and 环境影响以及电力系统应用的分析,提供了该技术在设计、特性及优点方面完全的阐述。本书对输电系统的规划、设计和执行的工程师来说是基本的参考资料,对全球范围的用户工程师、咨询工程师以及制造商都提供了完美的帮助。

CopyRight © 2012 John Wiley&Sons, Ltd

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled Gas - Insulated Transmission Lines, ISBN 9780470665336, by Hermann Koch, Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder

本书原版由 Wiley 公司出版,并经授权翻译出版。

版权所有,侵权必究。

本书中文简体翻译出版授权机械工业出版社独家出版,并限定在中国大陆地区销售。

未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

本书封面贴有 Wiley 公司的防伪标签,无标签者不得销售。

本书北京市版权局著作权合同登记图字:01-2013-5544 号。

图书在版编目(CIP)数据

气体绝缘输电线路/(德)赫曼·科赫(Hermann Koch)著;沈威,杨思民,杨建军译. —北京:机械工业出版社,2016.8

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文:Gas - Insulated Transmission Lines (GIL)

ISBN 978-7-111-54885-0

I. ①气… II. ①赫…②沈…③杨…④杨… III. ①气体绝缘-输电线路 IV. ①TM726

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 222685 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:张俊红 责任编辑:赵玲丽

责任校对:刘 岚 封面设计:马精明

责任印制:常天培

涿州市星河印务有限公司印刷

2017 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 16 印张 · 324 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-54885-0

定价:99.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88361066

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294

机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网:www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

译者序

科赫博士在西门子能源管理集团输电解决方案部门负责技术与创新工作，在国际电工委员会（IEC）第 17C 分技术委员会担任秘书。2004 年中国电力企业联合会成立了电力行业标准“气体绝缘金属封闭输电线路技术条件”工作组，科赫博士参加了这个工作组并陪同工作组成员参观了在瑞士日内瓦机场展览中心的气体绝缘输电线路（GIL）运行现场。在他的积极参与下，中国第一个 GIL 标准——DL/T 978—2005《气体绝缘金属封闭输电线路技术条件》于 2005 年正式发布。

科赫博士还担任国际大电网会议（CIGRE）“GIL 在长距离大容量结构的应用”工作组 B3/B1.09 的召集人，同时他也在美国电气电子工程师学会（IEEE）电力和能源学会（PES）电站委员会主持气体绝缘变电站的培训工作，迄今他已在美国、加拿大、南美及印度等 20 多个国家开展了培训。

GIL 技术具有输送容量大、可靠性高、电容量小、损耗低、过载能力强、免维护、无老化现象、环境友好等优点，由于这些优点，自该技术问世以来已经有 300 多公里的 GIL 在世界各地投入运行。GIL 技术的发展也促进了国际标准、国家标准和行业标准的制定。IEC 第 17C 分技术委员会在 1998 年出版了技术报告：IEC 61640《额定电压 72.5kV 及以上刚性高压气体绝缘输电线路》；我国国家发展和改革委员会于 2005 年发布了中国电力行业标准：DL/T 978—2005《气体绝缘金属封闭输电线路技术条件》；国家质量监督检验检疫总局和国家标准化管理委员会于 2008 年发布了国家标准：GB/T 22383—2008《额定电压 72.5kV 及以上刚性气体绝缘输电线路》；IEC 第 17C 分技术委员会在 2011 年出版了国际标准：IEC 62271 - 204《额定电压 52kV 及以上刚性气体绝缘输电线路》。

近些年来中国电力工业的发展也给 GIL 技术的应用提供了很多机会，大亚湾、岭澳核电站，拉西瓦、锦屏、溪洛渡水电站等电站的送出工程相继使用了 GIL 技术。随着社会各界对可靠性以及环境的要求越来越高，会有更多的工程需要使用 GIL 技术，因此我们决定把这本书翻译成中文，以便于国内设计、制造以及运行部门的工程技术人员以及大专院校的学生参考。本书第 1~3 章由沈威翻译，第 4~6 章由杨思民翻译，第 7~10 章由杨建军翻译。

译者

原 书 序

电力输送的传统方式是采用架空线，但是在一些环境有限制的场合就需要采用地下输电线的解决方案。现今已经有一些地下输电线的方案，其中最普遍的就是电缆，然而气体绝缘输电线路（Gas – Insulated Transmission Lines, GIL）也是一种经常用到的解决方案。GIL 可以直接埋入地下，也可以敷设在隧道中或户外构架上。由于直埋式 GIL 可以和景观很好相处，因此可以得到数千米甚至数十千米的连续敷设应用。GIL 有很多优点，包括载流能力强、损耗低、电容量低等。

虽然 GIL 技术主要来自于气体绝缘开关设备的经验，但还是有很多诸如设计、安装和维护方面的特性和规范需要考虑。赫曼·科赫从事这个专业达 20 年之久，他写的这本书给这个技术作了非常全面的论述，该技术自 20 世纪 70 年代开始代替电缆并得到越来越广的应用。第一代 GIL 技术使用纯 SF_6 气体和法兰连接技术，第二代 GIL 技术使用 SF_6 和 N_2 的混合气体以及导体和外壳的焊接连接技术。本书介绍了 GIL 的绝缘特性和设计特点，也介绍了现场装配和敷设方式以及质量保证和试验手段，包括诊断工具。对不同敷设方式的特别要求也提出考虑。对系统、网络、环境及经济性也都提出了考虑。本书最后对世界各地的 GIL 应用作了图解说明并对 GIL 与其他输电系统作了技术、经济、现场以及美学、隐形和噪声等软特性作了比较。

本书对当前从事系统布置的工程技术人员很有益处，对电力系统专业的学生也有帮助，对希望了解地下输电技术的读者也提供了丰富的信息。

克劳斯·诺伊曼教授
于德国埃森

目 录

译者序

原书序

第 1 章 前言 1

- 1.1 电力供应的发展 1
- 1.2 GIL 的优点 3

第 2 章 历史 5

- 2.1 电网的发展 5
 - 2.1.1 总论 5
 - 2.1.2 输电级别 6
 - 2.1.3 长距离输电 7
 - 2.1.4 输电网的额定电流 11
 - 2.1.5 电网发展的结论 11
- 2.2 GIL 的发展史 12
 - 2.2.1 第一代 GIL 12
 - 2.2.2 第二代 GIL 16
 - 2.2.3 全球范围的经验 23

第 3 章 技术 25

- 3.1 气体绝缘 26
 - 3.1.1 自由气体空间 27
 - 3.1.2 绝缘件 28
 - 3.1.3 气密外壳 28
 - 3.1.4 绝缘气体 29
- 3.2 基本设计 43
 - 3.2.1 概论 43
 - 3.2.2 由绝缘确定的尺寸 46
 - 3.2.3 由发热确定的尺寸 46
 - 3.2.4 绝缘配合 46
 - 3.2.5 电气优化 46
 - 3.2.6 输电网的研究 47

3.2.7 由气体压力确定的尺寸 47

3.2.8 高压设计试验 48

3.2.9 额定电流设计 49

3.2.10 额定短路电流设计 49

3.2.11 内部电弧设计 50

3.2.12 电动力设计 51

3.2.13 机械设计 52

3.2.14 一体化的过电压保护 52

3.2.15 颗粒 53

3.2.16 发热设计 53

3.2.17 抗震设计 58

3.3 产品设计 62

3.3.1 技术参数 62

3.3.2 导体管 64

3.3.3 外壳管 64

3.3.4 气室的大小 65

3.3.5 绝缘件 65

3.3.6 滑动触头 66

3.3.7 模块设计 66

3.3.8 与架空线的连接 68

3.3.9 弯曲半径 69

3.3.10 导体和外壳的连接技术 69

3.3.11 防腐蚀 74

3.3.12 现场装配工作 76

3.3.13 监测 76

3.4 质量控制和诊断工具 79

3.4.1 零件的质量 80

3.4.2 过程的质量 80

3.4.3 局部放电检查 81

3.4.4 现场高压试验 82

3.4.5 质量控制结论 84

3.5 规划问题 84

3.5.1 电网的影响 84

VI 气体绝缘输电线路

3.5.2 可靠性	92	4.3.3 与其他输电系统的比较 ...	155
3.5.3 接地	93	4.3.4 冷却和通风	156
3.5.4 安全	94	4.4 运行方面	156
3.5.5 环境限制	94	4.4.1 概述	156
3.5.6 相角补偿	96	4.4.2 可用性	157
3.5.7 载荷能力和过载能力	96	4.5 老化	159
3.6 规范检查表	99	4.6 内部电弧故障	159
3.7 敷设方式	102	4.6.1 概述	159
3.7.1 概述	102	4.6.2 被动保护	160
3.7.2 地上敷设	103	4.6.3 电弧定位	160
3.7.3 沟渠敷设	106	4.7 维护	160
3.7.4 隧道敷设	107	4.8 维修	161
3.7.5 直埋敷设	110	4.9 人员安全	161
3.7.6 定向钻孔	120	4.10 绝缘配合	161
3.8 长期试验	121	4.10.1 概述	161
3.8.1 概述	121	4.10.2 典型 GIL 应用的过电压 ...	162
3.8.2 隧道敷设	122	4.10.3 GIL 的绝缘配合	166
3.8.3 直埋敷设	130	4.10.4 规定的试验电压	167
3.8.4 长期试验结果	145	4.10.5 计算数据的校验	169
3.9 气体处理	146	4.11 系统控制	170
3.9.1 概述	146	4.11.1 引言	170
3.9.2 混合气体处理	146	4.11.2 气体密度监测	170
3.9.3 结论	147	4.11.3 局部放电监测	170
3.10 调试和现场试验	148	4.11.4 温度测量	171
4.11.5 GIL 监测总结	171		
第 4 章 系统和网络	151	第 5 章 环境的影响	173
4.1 概述	151	5.1 概述	173
4.2 GIL 的线路参数	151	5.2 视觉冲击	173
4.2.1 理论基础	151	5.3 电磁场	173
4.2.2 电阻	151	5.3.1 概述	173
4.2.3 电容	152	5.3.2 基本理论	174
4.2.4 电感	152	5.3.3 最大场强	176
4.2.5 阻抗	153	5.3.4 计算	177
4.2.6 波阻抗	153	5.3.5 外壳感应反向电流	178
4.2.7 自然功率	153	5.3.6 GIL 的 EMF 测量	179
4.3 线路损耗	154	5.3.7 直埋式 GIL	184
4.3.1 概述	154	5.4 气体处理	184
4.3.2 GIL 的损耗	154		

5.5 热影响	185	7.2.14 溪洛渡, 中国, 2011	211
5.6 回收	185	7.2.15 锦屏 I, 中国, 2011	212
5.7 全寿命周期评价	186	7.3 未来的应用	213
5.8 碳足迹	186	7.3.1 概述	213
第 6 章 经济方面	190	7.3.2 交通隧道	213
6.1 概述	190	7.3.3 道路及高速公路	215
6.2 材料成本	190	7.3.4 地上安装及野外安装	215
6.3 装配成本	192	7.4 案例分析	215
6.4 线路损耗	193	7.4.1 大都市区域	215
6.5 影响成本的因素	193	7.4.2 伦敦	216
第 7 章 GIL 的应用	196	7.4.3 柏林对角线	217
7.1 概述	196	7.4.4 山区	218
7.2 应用实例	197	7.4.5 海洋	218
7.2.1 施卢赫湖, 德国, 1975	197	7.4.6 GIL/架空线混合应用	219
7.2.2 温得和克, 纳米比亚, 1977	198	第 8 章 输电系统的比较	220
7.2.3 约书亚瀑布, 美国, 1978	199	8.1 概述	220
7.2.4 鲍曼维尔, 加拿大, 1985 - 7	200	8.2 GIL 的特点	220
7.2.5 Shin - Meika 东海线, 日本	201	8.3 技术比较	221
7.2.6 PALEXPO, 日内瓦, 瑞士, 2001	204	8.3.1 概述	221
7.2.7 百特威尔逊电厂, 美国, 2001	205	8.3.2 损耗	221
7.2.8 柿莲, 泰国, 2002	206	8.3.3 磁场	223
7.2.9 PP9, 沙特阿拉伯, 2004	207	8.3.4 电压额定值	224
7.2.10 开罗北, 埃及, 2005	208	8.3.5 电流额定值	225
7.2.11 海姆霍, 米德兰, 英国, 2005	208	8.3.6 短路电流额定值	225
7.2.12 黄河拉西瓦, 中国, 2009	209	8.3.7 过电压	225
7.2.13 克尔斯特尔巴赫, 德国, 2010	210	8.3.8 温度限制	226
		8.4 现场的比较	226
		8.4.1 可接近性	226
		8.4.2 最大重量	226
		8.4.3 最大体积	227
		8.4.4 土壤的类型	227
		8.4.5 运输道路	227
		8.4.6 现场车间的尺寸	227
		8.5 软特性	228
		8.5.1 概述	228
		8.5.2 美学	228
		8.5.3 隐形	228

VIII 气体绝缘输电线路

8.5.4 噪声	229	9.5 下一代技术	236
8.6 经济性	229	9.6 海上环境	237
第9章 输电管道	230	第10章 结论	238
9.1 可行性研究	231	参考文献	240
9.2 欧洲海上风电	232		
9.3 海底隧道系统	232		
9.4 海上和岸上 PTP TM 构造	235		

第 1 章 前 言

本前言介绍了气体绝缘输电线路（GIL）会在未来输电系统中起到重要作用的原因以及本书在现在写成的原因。

1.1 电力供应的发展

当今的输电系统即将发生根本改变。温室效应将改变发电的结构，可再生能源的使用会比目前有极大的增加，近岸和海上风电、太阳能、光伏、生物、水力、地热以及潮汐、海浪、洋流等海洋发电都是用来发电的可再生能源。

这些可再生能源产生的电力可以作为大规模发电装置或作为分布式小型发电装置进入电力市场。大规模发电装置通常远离负荷中心，因此需要通过电网来连接^[1]。

管理这些新能源需要智能化的潮流控制系统，也称为“智能电网”。基于电力市场交易价格的智能电力消费要求发电厂到消费者之间的电力输送。风能、太阳能、潮汐和海浪以及其他具有波动特点的可再生能源带来了潮流的波动，也要求对潮流的控制和长距离输电。为了更有效地利用这些具有波动性质的可再生能源，电能储存将起到更重要的作用，在可再生能源富余时把电能储存起来而到可再生能源缺乏时使用，这种平衡是可再生能源得到有效利用的基础。

储存电能的途径有几种，其中最为普遍的就是在能源富余价格低时把水抽到高处的蓄水池而在价格高时用储存的水发电。目前这种抽水蓄能电站用于在每天用电高峰时发电数小时。大型抽水蓄能电站每天可以发电 1000MVA 数小时，然后需要继续蓄水，这样的蓄能装置通常坐落在人烟稀少地区因此也远离用电负荷中心。在欧洲，这样的条件已经很少了，阿尔卑斯山和比利牛斯山可利用的空间是很有限的，而低海拔地区也不能提供所需的容量。远距离的蓄能装置也需要输电线路把电能和消费者联络起来。

把压缩空气储存在大型矿山或山洞里是另一种储存能源的方式，在可再生能源富余时把空气压缩后储存在矿山或山洞里，而在可再生能源缺乏时把压缩空气释放出来通过涡轮机来发电。目前美国和欧洲都在开展这方面的探索，大家希望在靠近负荷又有矿山或山洞的地区找到一个成本相对较低的储能方式^[223]。

还有一种大容量的储能方式是用富余的太阳能和风能通过电解制氢，并在高压（约 30MPa）条件下储存在地下 4000 ~ 5000m 深的岩盐层洞穴里。目前这种技术正在用于储存天然气。这种储能方式可以在北海地区的冬季，例如一月份的几个无风日中，用储存的氢气通过燃气轮机来发电。

住房的加热或冷却或商用冷库是另外一种储存电能的方式。加热或冷却是根据可再生能源的可获得性来调节，当可再生能源富余时加热或冷却住房，然后住房按其时间常数来储存这些能量。这可以通过能源价格策略来实现，建筑的加热或冷却在能源消费平衡中起作用。

把可再生能源储存在电动汽车的电池中是另外一种储存电能的方式。电动汽车大部分时间是静止的（车辆的 80% ~ 90% 的寿命在静止中度过），电动汽车的电池分布得非常分散并且可以提供大量的电能。把电动汽车连接在电网中可以通过智能电网来控制其从电网中充电或向电网送电。电池可以在很短的周期内在充电和送电之间切换，因而可以在基于波动性质的可再生能源供电系统的稳定性上做重要贡献。

可再生能源的储存是可再生能源市场的一个关键特性，在阳光或风力富余时电力市场收取电能并储存起来而在市场上需要更多能源时高价卖出。

小型和大型的储能装置都是必需的，如上文介绍，典型的分布式小型储能装置就是电动汽车的电池。就时间来说，电动汽车可以提供数分钟或数小时的供电，但在可再生能源缺乏数日或数周情况下就需要大型储能装置。

未来的大型可再生发电设施将远离都市电力消费中心，海上风电场和沙漠太阳能发电都坐落在能源消费很少的地区。大城市只占地球很少的一部分，但是它们的密度和电力消耗却在增长。大型储能装置通常和用户距离很远^[2,3]。

这样就需要长距离大容量输电来把发电和用电联系起来。为了平衡可再生能源需要大范围互联，例如从北海和波罗的海到法国和西班牙的大西洋海岸，或从美国的东北部到东南部在远距离条件下利用风力^[4]。

现在的输电系统并未提供理想的长距离、大容量输电网络。地区间只有很弱的互联来处理当某一地区大型发电机组（如 1500MVA）停机而另一地区需要供电的紧急情况。

当前热电厂通常坐落在靠近用户的地区来给当地提供所需的电力。未来可再生能源发电就不同了，未来需要长距离大容量连续输电网络，也称为超级电网。超级电网把发电厂和负荷中心的用户以及储能装置（如抽水蓄能）联系起来。

由于其他原因，这种大容量、长距离输电线路在中国和印度已经或正在建设。这两个快速发展的国家都在利用大型水电装置来发电，例如中国的三峡和印度的特赫里，数千兆瓦的电力通过 1000 多公里的长距离输电送到上海和孟买等大城市。

中国和印度的先进高压输电技术表明长距离输电需要高可靠和高效的交流 1000kV 和直流 $\pm 800\text{kV}$ 特高压输电线路。中国从 2010 年投运了 $\pm 800\text{kV}$ 来实现大型发电站和大都市之间的连接。这些长距离输电线使用架空线方式，铁塔很高（通常 70 ~ 80m），导线束很大（8 分裂或 10 分裂导线，直径 500 ~ 800mm）。如此大型的架空线不是任何地方都能实现的，可能需要地下输电或至少在局部使用地下方式。对大容量输电的需求以及架空线和地下输电结合的可能性使得 GIL 成为整体

解决方案或至少是部分解决方案的良好选择^[217]。

现在有很多大型陆上和海上风电场在规划或建设,大型光伏电站以及太阳热能电站也在规划,试验性项目已被证实是可行的。在海上风电是最好的,在沙漠中太阳能是最优的,这些都需要长距离输电来补偿波动并把可再生能源带给消费者。

当架空线无法实现时,GIL 就提供了一个和架空线输送能力一样的(例如 400kV 输送 2000MVA)地下替代方案。

40 多年来第一代气体绝缘技术的应用经验是 GIL 用于地下输电系统的良好基础。气体绝缘技术在 19 世纪 60 年代开始用于变电站,目前以其高可靠性得到了非常广泛的应用。2001 年问世的用 N_2/SF_6 混合气体的第二代 GIL 以及降低成本的管道敷设方法使得 GIL 成为未来高可靠性和可用性的大容量、长距离地下输电系统^[168]。

1.2 GIL 的优点

如下所列,GIL 用于大容量输电具有一些优点^[9,10]。

输电损耗低 由于导体和外壳截面大,使得阻性损耗低。根据外径(500mm 或 600mm)以及外壳和导体的壁厚(6~15mm)典型的 GIL 电阻为 6~8mΩ/km。输电损耗和电流的平方相关 $P = I^2 R$ (I = 电流, R = 电阻)。当 GIL 的额定电流高时(如 3000A),损耗低的特性就更显著。绝缘气体中的损耗可以忽略不计。

电容负载低 GIL 的电容很小,一般为 55μF/km,因此只有在长度很长的情况下才需要相位角补偿。在传输距离 100km 左右的大多数网络情况下不需要或需要很少补偿线圈,这也降低了热损耗。

传输容量和架空线相当 GIL 是架空线的理想替代或补充方案。GIL 的高输送容量(550kV 单回达 3000MVA)使其与架空线串联直接通过地下而不需要降低容量。GIL 也允许使用和架空线同样的控制保护方式。在 GIL 和架空线结合时不需要不同的保护方式来确定故障位置。GIL 的电容小,因此涌流也小。

人身安全水平高 由于外壳可靠接地因此不可能接近高压部件(气密外壳)。GIL 在承受短路电流(50kA、63kA 或 80kA,1~3s)时的人身安全仍是可以保证的。试验证明即使发生内部电弧故障仍然不会对外部产生影响。

可靠性高 GIL 的唯一目的是输电,因而不需要内部开断或关合能力。根据这些特点可以把 GIL 看成没有运动部件(如开关)的高压气体绝缘系统。目前世界范围内已有单相长度超过 300km 的 GIL 系统投入运行 35 年以上。至今尚未有主要故障(系统内电弧故障)的报道。这一点使得 GIL 成为已知最可靠的输电系统。

无电老化 气体绝缘是不老化的。最好的例子是用空气作绝缘气体的架空线。绝缘件的电场强度和 GIL 的最高温度都非常低以至于不能产生电老化或热老化,这已经通过独立实验室的长期测试以及系统中大量在用设备的经验得到证实。第一个 GIL 项目在 1974 年投入使用,CIGRE 国际大电网对运行结果作了报道^[71,224]。

和架空线同样运行 架空线可以以自动重合闸方式运行，这就意味着当线路上检测到接地故障时，断路器会自动切除线路，过几秒钟后（取决于系统条件）再合上。多数情况下引发短路操作的条件会解除而使输电线恢复运行（例如，如果一段树枝距离输电线太近，这段树枝会被烧掉，如果故障电流由雷击引起，数秒后也会恢复）。

电磁场 为了保护公众以及操作人员，国际上对电磁场有限值要求，这些限值根据各地区和国家的法律和法规要求而不同。目前世界上的趋势是限值越来越小而限制更严。在人口稠密地区及城市，这些电磁场的要求规定了输电线的许用设计。

GIL 运行于可靠接地条件下因而感应回路是通过接地闭环的，耦合系数约为 95%，这意味着两个反向电流的重合减少了 95% 的外部电磁场，只有 5% 的导体电流产生 GIL 的外部电磁场。

根据感应定律，导体电流在外壳内会感应出同样大小但相位差 180° 的电流。两个电磁场的叠加结果接近为零。在限制周围磁场情况下，可靠接地的 GIL 可以满足非常低的磁场要求。当额定电流 3000A 时，周围几米的磁场强度可以达到 $1\mu\text{T}$ （一些国家要求如此）。

在输电线靠近居民区时，低磁场的优点是非常重要的，特别是对于有很多灵敏设备的机场、医院以及拥有很多灵敏电子设备的个人和商家来说。

在意大利，新装设备的电磁场要求磁通低到 $0.2\mu\text{T}$ 。当涉及居住区时，GIL 可以在数米范围内达到这样的低值。

无热老化 GIL 设计为可以在外部条件给定的最高工作温度下运行，在隧道中可接触温度为 60°C 或 70°C ，直埋情况下为 40°C 或 50°C ，不同的温度取决于不同的国家及其采用的标准和规定。

在所有情况下，导体 $100 \sim 120^\circ\text{C}$ 的最高允许温度是远远达不到的，因此，在这些运行条件下系统不会发生实际的老化。

第 2 章 历 史

本章介绍了电力供应的历史以及气体绝缘输电线的发展历程。

2.1 电网的发展

2.1.1 总论

当电气化于 19 世纪中叶开始时，发电装置是靠近用户的。发电机用 100V 直流向用户——电灯或电机送电。发电机由河流的水轮机带动，用户是家庭、农场、办公室和小型工业（如锯木厂）。

当城市开始使用电灯作路灯、工厂开始使用电机来生产时，电气化就加快了，用河流水力或蒸汽机的发电站用直流输送电力。由于直流电流很难开断，点对点连接是非常普遍的。在电气化的早期阶段，常常就直流和交流的相对优点展开讨论，争论围绕两个主要观点：

- 特斯拉观点——赞成交流电，因为可以转换为其他电压等级并且容易开合；
- 爱迪生观点——赞成直流电，因为传输损耗低并且传输效率高。

今天我们知道，交流电在电网发展的第一阶段获胜了，主要原因是更高电压等级的变压器以及开关元件。当交流变换到数千伏特，开关和断路器执行了可靠的操作后，电力的应用就更广泛了。大型发电站通过有开关的电网用交流高电压给更多用户服务。

随着交流技术不断开发新材料，更高的电压等级开发出来并且得到应用；随着电灯和电机的可靠性和使用寿命的改进，越来越多的用电设备安装起来因而更多电力消费增加了。到了 19 世纪末电压水平升高达到数千伏特，这时纽约、伦敦、巴黎和柏林安装了第一批集中式使用蒸汽机驱动的交流发电机。

随着绝缘材料的技术发展、绝缘件的生产以及对高压电场的深入理解，更高的电压等级投入使用。随着断路器和开关的发展，点对点的输电系统也发展为高压输电和中压配电的电网。输电电压到了 100kV 的数量级，小的地方发电商也互相合作把各自的系统连接起来成为城市范围的发电商和配电商。他们就成为最早的配电公司然后成为公用事业。

随着公用事业的成长，发电规模也在增长，公用事业的联合使得电力供应在大范围内实现。电厂的装机也在不断加大，从 100MW 到 500MW，后来到了 1000MW，与这些大容量电厂相适应，输电电压也上升了，欧洲的典型电压是

220kV，北美的典型电压是 242kV，这些输电电压在 20 世纪 20 年代初开始使用。输电电压的后一步提升发生在 20 世纪 60 年代，欧洲出现了 380kV，而北美和日本使用 345kV/550kV。在随后的年代里 345kV 至 550kV 的输电电压在世界范围得到应用。最高的输电电压出现在北美、南美、南非和俄罗斯——达到 735kV、765kV 和 1000kV。今天，特高压输电线已经出现在中国（1100kV）和印度（1200kV）。北美和欧洲也在规划用特高压输电线来把长距离的可再生能源连接到负荷中心^[12]。

2.1.2 输电级别

现在的电力系统可以划分为 5 个级别：本地、区域、国家、国际、洲际，见表 2.1^[13,14]。

本地级 电力系统的本地级（第一级）和用户的距离最近，通常为 1 ~ 5km，本地级别代表了电力系统的起源，也是 100V 直流开始运用的地方。随后的发展是从直流改成交流，典型的接线方式是相对地，在美国和日本用 100V，而在欧洲和亚洲以及南美洲用 240V。现在我们使用三相交流 400V 系统，这些电压等级使用相当普遍而且不会轻易改变，因为替换所有的用电设备成本相当高。

区域级 区域级（第二级）通常覆盖一个地区，典型的是城市及其周边地区。区域的典型范围是 100km 左右，电压等级 100kV 以下并且有大型发电装置安装在区域内。区域内的发电商可以是私有的，也可以是由城市或区域机构所有的公用事业。这些稍大的公司，跟那些本地的发电商相比，拥有更大的发电装置，运行更高电压等级的输电和配电线路，在更大的区域内为更多用户服务。在区域级别内有一些电压等级先后被使用：1kV，3kV，4.5kV，12kV，15kV，20kV，33kV，42kV，52kV，在世界上还可以看到更多在这些数值之间的电压等级。这些一步步提高的电压等级反映了绝缘材料的技术发展。现在的国际标准规定的配电电压为 1 ~ 52kV。

表 2.1 输电级别

级别	形式	举例	典型长度	典型电压级别	典型电流
1	本地	城市小发电商 城市公用事业，大都市如柏林、	1 ~ 5km	500V 以下	500A
2	区域	伦敦、纽约、巴黎，区域如巴伐利亚	100km	1 ~ 52kV	2000A
3	国家	国家公用事业如法国、意大利，大区如美国东北部	1000km	400kV* 和 550kV** 以下	4000A
4	国际/跨区	互联电网如 UCTE、NORDEL、MAGHREB、伊泰普、卡布拉巴萨	2000km	400kV* 500kV** 800kV**	5000A
5	洲际	洲际电网如欧非、欧亚	3000km	1100kV*** 1200kV****	6000A (预计)

* 欧洲、中东、印度、非洲
** 北美、南美、亚洲
*** 中国、日本
**** 印度

当区域输电和配电结构建立时会形成很多小的私有公司和公用事业公司，至今这些小公司仍在运行——为独立的城市和地区服务。这些区域供电商的范围典型为100km左右。现今的电力市场改革目标之一就是改变过去的垄断经营，改变所有制结构，在竞争机制中产生新的区域供电结构，目标是让电力使用者在法律和法规设定的条件下有权选择电力供应商。这将把新的参与者带入电力市场，更多的公司可以在市场中交易。在现在的输配电网络设计时工程师们还没有考虑电力交易，这意味着电网的设计和使用会发生基本改变。

国家级 国家级（第三级）供电可以由国家（如法国）或国家的部分地区（如美国的加利福尼亚）的边界来识别。在某些国家电力供应被看成国家任务因而通过政府规定来设立公共或国有公司。在欧洲有一些这样的国家级供电公司，如法国的EDF和意大利的ENEL。在其他联邦制国家，电力事业的发展是通过私有企业实现的，这些私有公司从发电量和服务的用户数量来说都和公用事业大小相当。在欧洲可以发现这样的供电公司（如德国的RWE、PrueussenElectra、Bayernwerk）。在北美区域性公用事业可以达到欧洲一个国家的范围（如东北部的纽约爱迪生，西北部的Bonville电力联合公司[BPA]，东南部的田纳西谷当局[TVA]）。

国家供电级别的典型范围为500~1000km，相应的电压水平在欧洲、中东、非洲、南美以及亚洲的部分地区达到420kV，在北美、日本、南美的部分地区、亚洲和非洲达到550kV。

国际级 国际或跨区级（第四级）指的是数个国家或大区组成的区域。第四级电网用于大型输电网的稳定，从历史的角度来说第四级电网的发展意味着用高压线在区域之间实现连接以应对某国家或地区发电厂失电的紧急情况。当发电厂或输电线出现故障造成电能损失时，相邻区域的连接对电网起到支持作用并使其稳定。欧洲的输电合作联盟UCTE规定两个1500MW的核电站的电力需由国际或跨区3000MW的备用容量来匹配。在电网的任一点的电能集中都要限制在这个范围内。欧洲和北美的典型国际或跨区电网范围约为3000km。

在欧洲，北部的NORDEL、中部的UCTE和东部的波罗的海电网是同步连接的。在美国有许多独立系统运营商（ISO），这些独立系统运营商在相同频率下运行并以较低的容量互相连接。

洲际级 洲际级（第五级）目前还不存在，但是会随着可再生能源在世界范围的应用对长距离输电提出的需求而发展。这一级别需要更高电压来覆盖长达3000km的长距离洲际输电。长距离就需要用到输电损耗低的高压直流输电。作为未来洲际输电水平的一部分，已经有一些线路在世界各地投入运行了。洲际输电可能还要30多年以后才实现，但目前中国和印度的项目证明其在技术上和经济上都是可行的。

2.1.3 长距离输电

非洲的卡布拉巴萨工程建于1977~1979年间，用来连接赞比西河的水利资源和1420km以外的工业化的南非，这条输电线的传输能力为1920MW，输电电压为

DC $\pm 533\text{kV}$ （见表 2.2）。

表 2.2 南非开发区卡布拉巴萨工程主要数据^[8]

投运	1979，于 2008 年更新
额定功率	1920MW
直流输电电压	$\pm 533\text{kV}$
架空线长度	1420km

图 2.1 是一个大型水坝，图 2.2 是一个小型水坝。大型水坝通常坐落在偏远地区且需要通过高压交流或直流输电线与负荷中心相连。小型水坝通常与负荷中心很近因而用较低的高电压相连。

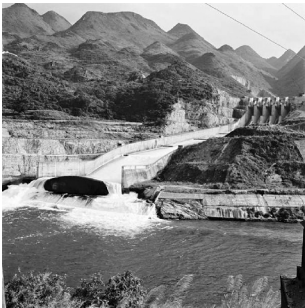


图 2.1 大型水坝举例
（由 Siemens AG 授权提供）

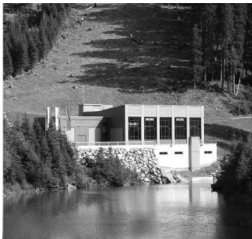


图 2.2 小型水坝举例
（由 Siemens AG 授权提供）

南美洲的伊泰普水电站把阿根廷/乌拉圭边界的水电传输到 800km 以外的巴西圣保罗地区，伊泰普水电站于 1987 年投入运行，两个直流系统把 6300MW 的电力输送到圣保罗及周边地区（表 2.3 是伊泰普工程的技术参数，图 2.3 是大坝里的 735kV 交流气体绝缘开关设备 [GIS]）。

表 2.3 巴西/阿根廷伊泰普工程主要数据^[16]

投运	1984 ~ 1987
额定功率	6300MW
直流输电电压	$\pm 600\text{kV}$
架空线长度	线路 1：685km 线路 2：805km

美国较早的工程之一是大西洋互联工程，该工程从俄勒冈的水坝把 3100MW 的电力输送到洛杉矶都市地区，输送距离为 1360km，见表 2.4。

高压直流输电线从 1970 年开始建设，1985 年、1989 年和 2004 年分几个阶段从额定功率 1440MW 升级到 1600MW、2000MW 和 3100MW，直流电压升高到 $\pm 500\text{kV}$ 。



图 2.3 水电站的高压气体绝缘开关设备（由 ABB Switzerland 授权提供）

表 2.4 大西洋互联工程主要数据^[17]

投运	1970 年、1985 年、1989 年和 2004 年
额定功率	1440MW > 1600MW > 2000 ~ 3100MW
直流输电电压	$\pm 400\text{kV} > \pm 500\text{kV}$
架空线长度	1360km

图 2.4 是 $\pm 800\text{kV}$ 架空线，塔高约 80m，塔间距约 500m。
在中国长江葛洲坝建设了高压直流输电线用来输送 1200MW 的电力到 1040km 以外的上海地区。

在中国南方已经有数条直流输电线投入运行，用来把昆明和贵阳周边山区的水电输送到 1000 ~ 1500km 以外的中国东南部广州和深圳的工业中心。几条输电线总共输送 12000MW 以上的电力。直流输电技术的新阶段从 2010 年开始，更高的输电电压 $\pm 800\text{kV}$ 得到应用^[18]。

图 2.5 和图 2.6 是贵广 I 回换流站的外部 and 内部视图。图 2.7 是贵广 II 回直流输电线的概览图^[196]。



图 2.4 $\pm 800\text{kV}$ 架空线
(由 Siemens AG 授权提供)



图 2.5 长距离直流输电线——贵广 I 回，
中国 (由 Siemens AG 授权提供)



图 2.6 悬挂在屋顶的换流阀， $\pm 500\text{kV}$ DC
(由 Siemens AG 授权提供)

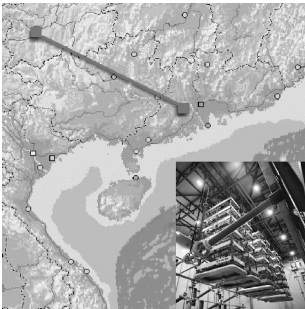


图 2.7 长距离直流输电线——贵广 II 回，中国，
2007，换流阀厅旁边的架空线和阻波器
(由 Siemens AG 授权提供)

表 2.5 是中国贵广 I 回工程的技术参数， $\pm 500\text{kV}$ 下的额定功率为 3000MW。

表 2.5 中国贵广 I 回的技术参数^[19]

额定功率	3000MW
电压	$\pm 500\text{kV}$
线长	940km
合同	2000 年 11 月 1 日
工程提前 6 个月于 2004 年 9 月竣工	
晶闸管：带一体化过电压保护的 5in 光触发晶闸管	

在交流电压方面，中国在 2009 年开始建设电压等级为 1100kV 的 600km 长的长距离输电线路。

在印度已经有数条长距离线路用于把电力输送到孟买、德里和加尔各答等都市区域。更多的直流线路在考虑中，对新的 1200kV 交流系统的研究也在进行。图 2.8 是被称为印度东南互联的直流长距离输电线，技术参数见表 2.6。

中国和印度都在规划更多的大容量长距离输电线路，主要原因是把水电等可再生能源输送到远距离的都市和工业地区。

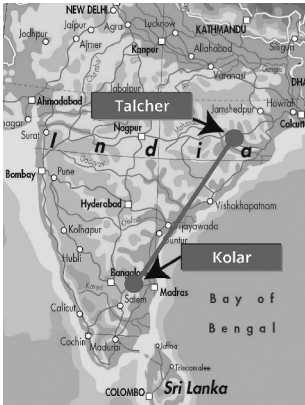


图 2.8 东南互通长距离直流输电线，印度（由 Siemens AG 授权提供）

表 2.6 印度东南互联主要参数^[20]

额定功率	2000MW，双极
直流输电电压	$\pm 500\text{kV}$
额定电流	2000A
输电距离	约 1450km

在欧洲，未来的大规模可再生能源也将需要长距离输电，欧洲北部的海上风电场以及欧洲南部和北非的太阳能发电都与电力负荷很远，因此也需要长距离大容量输电。

在北美，新的太阳能发电和风力发电将建设在亚利桑那州等沙漠地区，风力发电也会建在蒙大拿州，大型风电也会建在海上，所以这些可再生能源都与负荷中心很远，因此需要长距离大容量输电。

这些新的线路可以认为是未来洲际电网的一部分。这些工程都遵循一个共同的目标，即把可再生能源（水电、风电、太阳能）输送到远方的负荷中心，建成可再生、可持续发展的电力系统^[21,22]。

图 2.9 是安装在中国的世界第一条 $\pm 800\text{kV}$ 直流换流站。

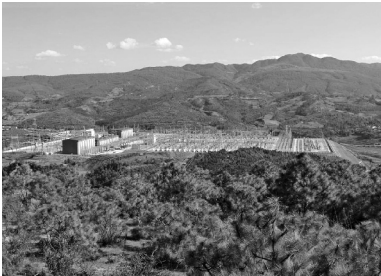


图 2.9 $\pm 800\text{kV}$ 换流站，中国（由 Siemens AG 授权提供）

2.1.4 输电网的额定电流

除了电压等级的提高,线路的额定电流也在增大。本地级的典型电流为 500A 以下,区域级的典型电流就到了 2000A;国家级的典型电流为 3000 ~ 4000A,有些区域有向 5000A 发展的趋势;国际级或跨区级的额定电流为 5000 ~ 6000A,最后,洲际级就可能达到 6000A 甚至 7000A (以中国目前的工程为参考并考虑规划中的工程)。

除升高电压等级以外,增大额定电流是提高输送容量的第二种方法,增大额定电流需要解决两个为题:发热和电动力。

发热与导体的传输损耗有关,损耗产生热量和高温。触头材料的最高温度通常为 100℃ 左右,如果需要更高的温度,材料成本就上升很快。

额定电流的持续流动产生热量,这是输电系统的正常工作状态。电流是导体直径和壁厚的设计参数,也决定了输电系统的尺寸。它们也和成本相关:材料越多,成本越高。

与发热有关的第二个方面是额定短路容量,根据网络构型通常是 63kA、80kA 和 100kA 持续 1 ~ 3s。这些非常高的电流值增加了发热,主要在触头系统,也会使温度超出限值。

除了发热以外,设计还需考虑克服导体间的电动力,这样的设计也会导致成本增加(如增加绝缘件的数量)。

电网的额定电流限制了输电的增长,设计的成本可能急剧增加,技术解决方案可能不具有经济性。额定电流也和尺寸相关,这也是额定电压升高的同时额定电流也同步升高的原因。

2.1.5 输电网发展的结论

自从 19 世纪中叶波士顿、纽约、伦敦、巴黎、柏林第一批使用电灯以来,150 多年的供电历史显示出惊人的变化和发展的步伐。如今电力已经是现代生活最重要的能源,没有电我们怎么生活?电力的重要性在未来还会增加。

未来数十年间,可再生能源会大大增加,电力生产过程中减少 CO_2 也会支持可再生能源。风能和太阳能会增加,而燃煤、燃气和核能会减少,这些变化从长远来说会对供电网产生极大影响^[23]。

从历史的观点来说,可以看出现今的供电结构将无法未来需要。直至目前,输电网都是按靠近用户来设置发电厂来设计的,这点在可再生网络中会发生变化,亦即远离用户的能源。

这个变化就需要更高电压等级以及更大额定电流的长距离输电,并且需要电压为 800kV、1000kV 甚至 1200kV 的全覆盖电网。输电网的大容量节点(如核电站)将与这个全覆盖的电网的点相连接。新的输电网络级别将被引进作为洲际输电网。

这个输电网是基于特高压 (Ultra High Voltage, UHV) 并可能被称为“超级电网”, 关于这方面的信息可以在“超级电网之友”网站上得到^[197,225]。

网络的变化需要新的解决方案, 除了目前架空线技术以及固体绝缘电缆技术以外, GIL 提供了一个大容量解决方案。GIL 提供了长距离直埋、地下或隧道安装条件下输送大量电能的机会。

GIL 的电压等级包括从 100 ~ 800kV 的高电压, GIL 大部分应用在电压为 420kV 和 550kV 的输电网, 800kV 等级仅在中国有少量应用。目前长距离高电压输电与大型水电站有关, 例如北美从加拿大的湖区送到美国东北岸的城市; 南美从伊泰普送到海岸城市; 俄罗斯从西伯利亚河流送到莫斯科地区; 中国从西部山区送到东部城市; 印度从北部山区送到南部和中部城市。在另外一些情况下大型化石电厂成为长距离输电的理由。美国从西南和南部煤矿区送到太平洋沿岸; 中国从东北煤矿区送到北京和上海城市区; 印度从中部次大陆送到北部德里都市区和西部孟买都市区。

在欧洲, 长距离输电线也在发展规划中, 驱动这一规划的是欧洲北部的风电资源和欧洲南部以及非洲北部的太阳能资源, 洲际电网正在考虑中。

最后, 洲际电网可能成为全球范围基于可再生能源的可持续供电的解决方案, 如图 2.10 所示。

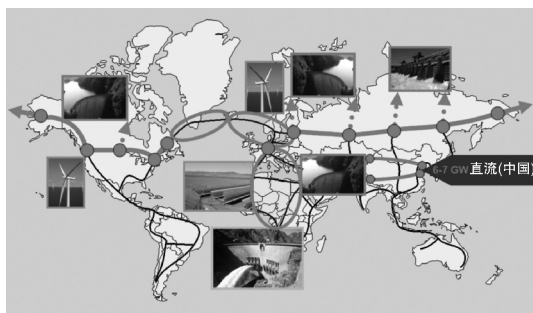


图 2.10 特高压输电图 (由 Siemens AG 授权提供)

2.2 GIL 的发展史

2.2.1 第一代 GIL

第一代是充以 100% 的 SF_6 气体, 可以是焊接或螺栓安装, 但是铝管不能弹性弯曲。

2.2.1.1 简介

GIL 研发的原因是什么?

GIL 研发的基本原因是基于一种人造气体: 六氟化硫 (SF_6), 这种气体具有非常好的绝缘性能。 SF_6 在 19 世纪 20 年代被发现, 是一种无毒、惰性、不燃、不腐蚀, 并具有长期稳定性的人造气体。它的电气性能使得高电压大电流得到技术经济可行的方案。当时的油技术已经达到了技术顶点, SF_6 绝缘又给电气的未来开启了新的发展阶段^[27-31]。

在 19 世纪 60 年代, 第一台 SF_6 气体封闭式实验装置被用来研究高压直流和交

流的性能,用绝缘件支撑的铝管导体和铝管外壳,充以 SF_6 气体,这样的结构具有良好的物理特性而成为大容量输电的最佳解决方案。对长距离来说,直流比交流的损耗低,所以最初的 GIL 是按直流来设计的。

当时的直流在绝缘系统的电气稳定性方面出现很多问题,一些物理现象,例如绝缘子的空间充电和绝缘子表面的表面电荷,还不为人所理解,结果 GIL 的研发还是走向交流系统。交流 GIL 的研发很成功,在此基础上气体绝缘技术引入了变电站。最初的应用是不带开关的母线段,由于 SF_6 良好的灭弧特性,很快在开关设备中得到应用。

SF_6 良好的绝缘性能减小了高压系统的尺寸,优良的灭弧性能提高了断路器和负荷开关的开合能力,目前还没有其他已知的绝缘气体具有这样的能力。 SF_6 断路器于 19 世纪 60 年代初应用于高压电网,第一套由断路器、接地开关、隔离开关和母线组成的成套 SF_6 开关设备于 1968 年问世。 SF_6 技术在市场上发展成了全球性、具有高开断能力和可靠性的成功的高压开关产品。目前已有成千上万个间隔的 GIS 安装在全世界所有电压等级的电网中。随着电压等级的提高和土地的有限性,GIS 的市场占有率有望提高。

GIL 的发展是和 GIS 同步的, SF_6 作为绝缘介质的成功和大容量输电的需求使 GIL 成为电网的新选择。GIL 在架空线由于公众不接受或环境局限而不能建设时可以作为输电系统的替代方案,在输送容量较高(如 2000MVA 时)可以部分或全部使用 GIL 作为输电网的解决方案。

与 GIS 的发展并行,不同的 GIL 技术得到了发展,有的是用 O 形圈和法兰连接,有的是焊接连接。不同的设计也有不同的名称:气体绝缘母线、压缩气体绝缘母线、母线、气体绝缘输电线(GITL)或气体绝缘线(GIL),这些名称目前是在世界范围使用的。1998 年国际电工委员会 IEC 引入了“气体绝缘输电线”的名称并简写为 GIL 作为优先使用的术语,该优先使用的名称 GIL 也可以是任何气体绝缘系统,大气压力或过压力,不具备开合或开断功能,长度在 500m 以上。这是 IEC 对 GIL 的实际定义。

GIL 用于变电站并与 GIS 连接时通过法兰连接,气体密封藉由与 GIS 技术相同的 O 形圈来实现,用于隧道、地上以及直埋形式的输电线时使用焊接连接。外壳和导体的型式有多种,在交流情形下使用铝及铝合金,管子可以用铝板、卷材或原材料挤制的。

板材用三辊轧机卷制成型并用一个直焊缝焊成管子,卷材用连续生产加工成螺旋焊管,原材料挤制管是一块铝合金在挤出机上被挤成管材,挤制管是无缝的。焊接技术有两种:手工焊接和自动轨道焊机。

典型的应用电压是 100 ~ 800kV,大多数的应用是在 420 ~ 550kV 电压等级的输电系统。世界上首个 GIL 项目安装于 1974 年并于 1975 年运行于德国黑森林施卢赫湖的山洞水电站,电压等级为 400kV,这种型式称为“第一代 GIL”^[49,74]。

2.2.1.2 首个 400kV 项目：施卢赫湖

第一代 GIL 工程的原因是什么呢？

施卢赫湖抽水蓄能电站在德国 400kV 输电系统电压和频率的稳定性上起到非常重要的作用。每数小时电站用山顶水库的水带动水轮机发出 1000MW 的电（发电模式）并通过两个系统向电网送电，或者在电力富余时用系统中 700MW 的电把水抽到山顶水库中（抽水模式）^[31]。

充油电缆发生过一次故障，这次故障不仅损坏了电缆也损坏了隧道，隧道业主在修复隧道时就在找一种不燃的输电系统于是找到了 GIL。GIL 从 420kV 高压变压器通过 700m 长的隧道连接到架空线。

施卢赫湖项目的技术参数见表 2.7。

表 2.7 德国施卢赫湖工程技术参数

型式	数值
额定电压	380kV
最高电压	420kV
额定电流	2000A
雷电冲击耐受电压	1640kV
操作冲击耐受电压	1200kV
工频耐受电压	750kV
额定短时电流	135kA
额定气压	7bar ^① abs.
绝缘气体	100% SF ₆

① 1bar = 10⁵ Pa，后文同。

施卢赫湖水电站的总体布置如图 2.11 所示。

在每一个山洞中有一台容量为 600MVA 的 420kV 变压器（1），该变压器由 GIL 与发电机相连接，每个 GIL 系统在靠近山洞处都装有气体绝缘避雷器（2）来限制发电机侧的过电压，在架空线铁塔处另外还装有避雷器（5）来限制来自架空线的过电压（如雷击引起）。

在两个 GIL 系统的垂直段当中，GIL 系统与山洞之间装有一个隔离开关使得架空线（6）可以与发电机在变压器（1）处分开。

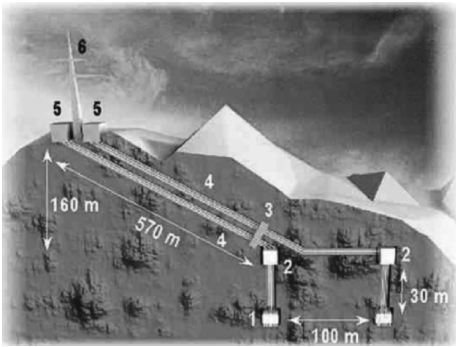


图 2.11 施卢赫湖总体布置图
（由 Siemens AG 授权提供）

图 2.12 是两个 GIL 系统安装在隧道内的斜坡方向视图，隧道开凿在岩石中，宽 2.8m，高 3.5m，GIL 管道安装于隧道侧面的钢支架上并且放置在适合热胀冷缩位移的滚轮上。7m 长的 GIL 分段在现场装配，接合处由轨道焊机焊接。为保证直

径和圆度的较小允差以满足高压裕度和距离的要求，还需要采用遵守严格焊接工艺的手工焊接工序^[33]。

1974 年的 420kV GIL 是世界上第一个气体绝缘安装所以出于安全的考虑选择了较高的试验电压。雷电冲击电压定为 1640kV，35 年后的今天国际标准值为 1425kV；操作冲击电压也是如此，当时是 1200kV 现在只要 1050kV；工频试验电压施卢赫湖工程是 750kV，现在是 630kV（见表 2.7）。

有了这些预防措施，第一代新 GIL 技术于 1974 年在德国黑森林施卢赫湖抽水蓄能电站投入运行，至今仍在运行从未发生过重失效。

采用较高试验电压水平的第二个原因是德国南部黑森林地区雷击发生频繁，雷击产生暂态过电压，过电压沿架空线进入 GIL，选择较高试验电压水平就可以覆盖这些较高的过电压。

设计第一代 GIL 的工程师知道全世界都希望这个项目成功；不能失败。结果他们就选择了较高的试验电压，希望在 420kV 电压等级新技术取得更多经验以后再降下来。

今天我们可以说施卢赫湖的 GIL 已经连续运行了 35 年以上没有问题，气体绝缘技术作为非常可靠的高压设备已经成为事实。

我们可以学到什么？

气体绝缘系统一旦安装并投入运行就能长期可靠工作不会有任何老化迹象。

- 设计第一代、单相、SF₆ 绝缘、称为 GIL 的气体绝缘设备，开拓性工作是必须的。

- 第一代 GIL 的主要应用场合是变电站或发电厂，典型的应用方式是连接气体绝缘开关设备（GIS）和架空线或变压器。

- 在水电站通过隧道把发电装置的高压端和电网的架空线连接起来。

- 第一代 GIL 在输电网长距离应用的绝对成本太高，因此需要开发第二代 GIL^[46,49,74]。

2.2.1.3 第一代 GIL 的经验

世界上首个 420kV GIL 用于连接德国施卢赫湖抽水蓄能电站和山顶上的架空线，随后接入输电网。GIL 在 1974 年和 1975 年建造，至今已运行了 35 年，该系统长度 700m，共有两个系统，可以传输 2000A。该装置穿过山体隧道并用作负荷高峰水力发电站，在夜间负荷低谷时把水抽到山顶水库中，在白天负荷高峰时用这些水发电填补负荷。因此在大多数时间 GIL 每天或抽水或发电都是在额定电流运行。这个 GIL 自从安装到现在已经无中断运行了 35 年以上，具有非常高的运行可



图 2.12 向隧道内的视图

（由 Siemens AG 授权提供）

靠性。在 2000 年到了 25 年计划内检修时用户和制造商决定 GIL 不做任何维护工作, 检修时间再延长 10 年, 到 2010 年再做下一次检查。在实际运行的装置上没有任何老化的迹象, 这个经验和 CIGRE SC15 工作组的结果是一致的, 他们的报告提到气体绝缘系统实际上是没有老化的^[224]。

气体密封性 GIL 在施卢赫湖的运行经验表明焊接管没有泄漏现象, GIL 的密封性在 35 年运行中不需要补充气体。因此, 现场焊接的 GIL 可以认为是气密的。

过电压和避雷器 投入运行 5 年后发生了一场大雷雨, 闪电击中了 GIL 套管附近的架空线并造成 GIL 内部闪络, 输电中断。事故的主要原因是未在山洞中最佳位置安装过电压避雷器, 因为当时的氧化锌避雷器体积太大了。这次事故以后有了更小的氧化锌避雷器, 这样把避雷器装在架空线塔的最佳位置, 在后来的 30 年中未再发生其他事故。

事故发生经过:

1980 年 6 月强闪电击中了架空线最后一个塔并在 L2 导体产生了 100kA 以上的事故电流, 暂态过电压波进入 GIL 但是未被山里避雷器洞中的氧化锌避雷器识别出来, 过电压波到达 GIL 终点处的变压器套管, 由于反射效应, 过电压加倍, 暂态加倍的过电压波反向沿变压器套管到避雷器洞中氧化锌避雷器之间未保护的 GIL 段行进, 造成 GIL 闪络, 保护装置切断电源。

GIL 损坏部件更换后修复, 通过高压试验后恢复运行。为了避免 GIL 将来再遭受过电压, 在 GIL 套管前新装了一组氧化锌避雷器。从那以后再没有发生过事故, 而且这个解决方案至今在 GIL 与架空线直接连接时还在使用。结论是 GIL 与架空线连接时需要在架空线与 GIL 的过渡点装设避雷器。

2.2.2 第二代 GIL

第二代 GIL 使用混合气体, 例如 80% 的 N_2 和 20% 的 SF_6 , 可以是焊接或法兰连接, 弹性弯曲半径可以到 400m^[206]。

2.2.2.1 第二代 GIL 的样机

开发第二代 GIL 的原因是什么?

为什么第二代 GIL 是必要的?

有两个主要理由:

理由一: 如前解释, 未来的输电网需要更多的地下解决方案。新的用于可再生能源的输电线和新的长距离输电线需要 GIL 作为技术备选方案。

理由二: 第一代 GIL 的成本需要砍掉 50% 来使长距离项目具有经济性, 这些已经通过新的敷设工艺和管道敷设演变过来的技术变得可行。

以上两个理由是 1994 年为未来 GIL 寻找技术解决方案的研发项目的基础, 未来 GIL 的设计在可行性研究中作了解释。表 2.8 是 1994 年与 EDF (法国电力公司) 确定的第二代 GIL 关键技术参数。

关键技术参数要求大容量地下输电系统来解决长达 100km 的网络连接，3000 ~ 4000MW 的输电要求是为了系统稳定的限值。三个 GIL 设计团队（ABB、阿尔斯通和西门子）提出了两个基本方案：一个三相绝缘设计和两个单相绝缘设计^[38-41]。

表 2.8 EDF1994 年可行性研究的主要技术参数

三相系统功率	3000 ~ 4000MW
额定电压	400kV
最高电压	420kV
额定电流	4300 ~ 5700 A
系统长度	100km 以内
绝缘混合气体	N ₂ > 80%，SF ₆ < 20%
敷设方式	直埋

三相绝缘设计有三个铝导体和一个镶嵌铝的钢外壳。钢外壳有压力容器的功能，能满足 15 ~ 20bar 绝对压力绝缘气体的压力。镶嵌的铝防止电气屏蔽并允许电流流通。三相 GIL 的直径约为 1.5m。

单相绝缘型式有一个铝导体和一个铝外壳，绝缘气体压力约为 8bar 绝对压力，直径为 0.5m。

三相和单相系统都是焊接连接并且都采用直埋方式，混合气体都是氮气（N₂）和六氟化硫（SF₆），根据压力和尺寸 N₂ 含量从 80% ~ 98% 不等，SF₆ 含量从 2% ~ 20%。

三相和单相的解决方案在制造、敷设工艺、现场试验、运行、维护和维修等所有方面都进行了深入的研究。三个设计单位也分别制造了样机并进行了所有电气、机械和热力设计试验。

结果是这样，从技术角度来说，三相和单相 GIL 都是可行的。根据应用方式，三相 GIL 具有减少空间的优点但是内部导体布置复杂；单相 GIL 需要更大的敷设空间但是内部导体和绝缘件的布置简单。由于单相 GIL 导体和绝缘件设计简单因而敷设容易，西门子和 ABB 选择了这种技术作为第二阶段的研究。在第二阶段的研究中制做了 100m 长的直埋 GIL 样品来模拟设备的使用寿命。共有两个样品：一个是 ABB 的设计在巴黎附近 Les Renardieres 的 EDF 试验场；另一个是西门子设计在德国柏林 IPH 试验场^[38]。

两个试验都通过 GIL 模拟 50 年的运行寿命做了长期性能的研究，试验包括修复工艺，在第 3 章有详细介绍。样机表明现场装配在理想条件下进行，需包括所有型式的 GIL 使用元素，试验要求应涵盖 GIL 运行寿命期间所有应力。

对于隧道安装的类型西门子又在柏林 IPH 试验场设计制作了第二个样机。隧道安装型式不需要直埋型式的防腐蚀措施，但是需要热胀补偿器。隧道安装的类型 GIL 可以用于城市及都市地区^[42]。

2.2.2.2 世界首个隧道安装的第二代 GIL

国际电信联盟（ITU）选择日内瓦作为 2003 国际电信展览会的东道主，要求

增加展览区域，日内瓦城决定在 A1 高速公路靠近日内瓦 Cointrin 国际机场的 PALEXPO 会展中心建设新的展厅。但是连接 Verbois 和 Foretaille 的高压输电线成为扩建展厅的主要障碍，该线路属于西瑞士能源公司（eos），是瑞士重要的电力公司。这条 220kV 双回输电线连接日内瓦 Canton 主要变电站，是 UCTE 电网的一部分，对瑞士西部的高压电网至关重要，为了寻找保留这条线路的解决方案对不同的方案作了研究^[201]。

在不同方案中需要提到的是：

- 提高架空线方案被邻近的机场拒绝，因为会和飞机冲突。
- 由于使用屋顶的限制，在屋顶安装铝合金管的方案未被接受。
- 因为时间很紧，把输电线从 PALEXPO 区域移走也不现实。
- 最后选择的方案是建设一条 420m 的地下通道，可能的输送方式有：GIL 或电缆。

最后选择了 GIL 而没有选择其他技术是因为它的磁干扰水平低、输送容量大、热效应低等主要优点。这个项目成为第二代 GIL 和高压架空线相连接的首次应用^[61]。

PALEXPO 项目的技术参数见表 2.9。

表 2.9 PALEXPO 项目的技术参数

型式	数值
额定电压	300kV
最高电压	220kV
额定电流	2000 A
雷电冲击耐受电压	1050kV
操作冲击耐受电压	850kV
工频耐受电压	460kV
额定短时电流	50kA/1s
额定气压	7bar abs.
绝缘气体	80% N ₂ /20% SF ₆

架空线输送的电通过套管与 GIL 相连，由地下隧道穿过瑞士日内瓦机场新建的 PALEXPO 展厅。

图 2.13 示出装置的总体布置图。

架空线通过塔 176 和塔 175 之间的 GIL 的隔离模块（4）与 GIL 相连，GIL 直线段沿隧道（2）敷设成弯曲半径为 700m 以下的 S 形弧线，在隧道末端有膨胀节模块（3）用于补偿热胀效应。GIL 在隧道终端通过角模块（7）进入隧道，GIL 在隧道中部由钢结构固定在隧道内壁（6）上，在隧道中有滑动支撑（5）的钢结构托住。在安装时由安装井（1）进入，安装井在竣工后关闭。

图 2.14 是进入隧道的视图，隧道高 2.4m，宽 2.6m。管子由间距 28m 的钢结构支撑，并在热胀时可以滑动，单件螺旋焊管的长度是 14m。

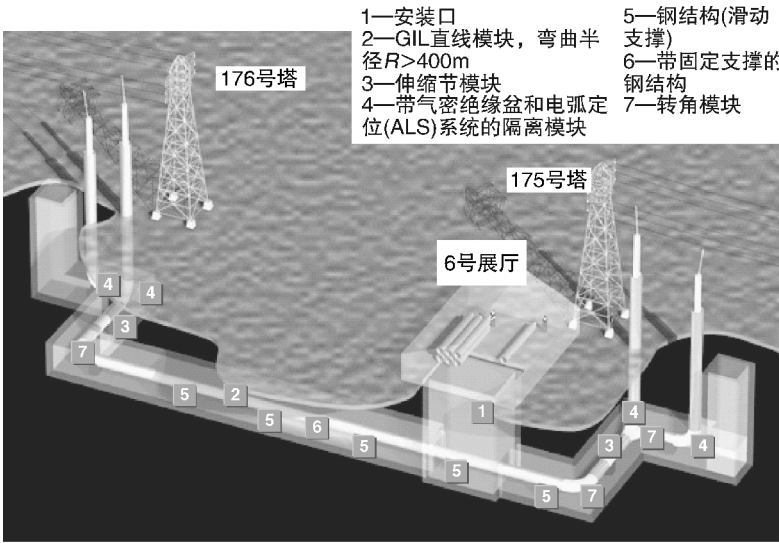


图 2.13 PALEXPO 总体布置图 (由 Siemens AG 授权提供)

预制的管子运到现场在装配棚中做隧道内连接过程的准备工作，GIL 段的预装配需要在清洁环境中进行，以满足高电压系统的要求，如图 2.15 所示的现代轻型帐篷可以提供这样的环境。焊接技术的关键设备是如图 2.16 所示的轨道焊机。



图 2.14 有两个 GIL 系统的隧道
(由 Alpiq Suisse SA 授权提供)



图 2.15 轻质帐篷 (由 Siemens AG 授权提供)

轨道焊机高度自动化，可以完成质量均匀的焊缝，导体和外壳都是焊接完成的。做到高速敷设的前提是高度一致的质量水平来避免后面耗费时间的返工和修理。这种焊接的使用效果很好，使人们对未来长距离敷设 GIL 的生产率有了乐观的态度。图 2.14 隧道内的图片摄于 2001 年 1 月 20 日，系统刚刚完成调试。这段 1km 的 GIL 系统仅仅用了创纪录的三个月时间就完成了现场工作，其间整个团队还享受了一周的圣诞假期。

预制的棚帐直接安放在架空线下并且直接坐落在连接街道下面隧道的竖井上，

现场空间很窄，一边是进入机场的路，另一边是通往法国的高速公路，现场工作只能在架空线下面的空间进行。敷设工艺证明是可以用于长距离连接的。有了现场的经验，GIL 装配的生产率大大提高——从每天每班两个接口提高到每天每班四个接口，这对未来的项目是非常积极的经验，特别是对长距离 GIL 的施工来说。高度自动化的焊接工艺被证明可以在整个敷设阶段交付稳定的质量，这样就使得系统调试没有任何失效^[45,46]。

图 2.17 是隧道内向的视图，可以看出管子是被拉进隧道的。隧道的弯曲半径约为 700m，管子通过滚轮上的支撑结构很容易移动并跟随隧道的弯曲^[47]。



图 2.16 轨道焊机（由 Siemens AG 授权提供）



图 2.17 GIL 拉入隧道（由 Siemens AG 授权提供）

图 2.18 是 GIL 在地下隧道的工作和敷设方案，GIL 段从隧道开口（1）进入并通过轨道焊接来连接，直线单元（2）被拉进弯曲半径 700m 以上的隧道。GIL 在固定点（6）被固定在隧道上使得 GIL 可以在滑动钢结构上实现热胀位移，膨胀节（3）用来补偿外壳的热胀位移，隔离单元（4）用来连接 GIL 和架空线并分隔 500m 长的气室。

除了有竞争力的价格以外，用户在这个应用选择 GIL 的主要原因第一是 GIL 外

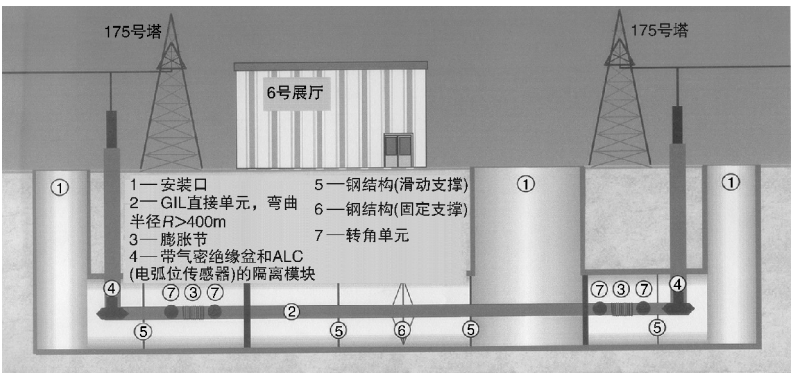


图 2.18 地下隧道内的 GIL 施工方案（由 Siemens AG 授权提供）

面的磁场强度低，第二是 GIL 的电气特性和架空线类似，对整个系统的控制和保护有优势。

2.2.2.3 隧道安装的第二代 GIL 的经验

这个 GIL 项目的主要经验是什么？

- 满足高压设备清洁度要求（绝缘件、气室等）的现场安装条件得到成功满足，自动焊接工艺可以生产出质量高度稳定的焊缝，经过对 300 个轨道焊缝每个焊缝 100% 的超声检验，只有不到 10 个需要手工返工。

- 第二代混合气体 GIL 被证明是可靠的，经过高压试验后投入运行没有任何失效。

- 半径达 700m 的弹性弯曲允许适合隧道的弯曲而不需要转角模块。

- 弯曲状态下 GIL 段的拉入式装配实施起来没有问题，也没有延迟时间，隧道内简单的输送结构工作良好。

- 可行性研究的结果在用于 PALEXO 项目时被证明偏保守，发热和机械强度的计算值低于可行性研究的实测值，说明计算参数取得偏保守。

这段典型的 GIL 输电线是连接法国与瑞士的架空线的一部分，用套管直接和架空线连接，当中没有任何开关器件。GIL 的安装和调试在很短时间内完成且没有任何问题。从 2001 年 1 月开始 GIL 投入满负荷运行，表现出优秀的输送性能和可靠性，在任何输电水平都没有发现负面影响，可以预见 GIL 具有非常长的寿命^[49]。

PALEXPO 选择 GIL 的一个重要原因是 GIL 外面的磁场强度非常低，即使在额定电流通过导体时也如此。PALEXPO GIL 安装于日内瓦机场附近并从 PALEXPO 展厅下穿过，像“日内瓦汽车展”和国际电信展这类展览都是很敏感的，因此对低磁场的要求很高，限值只有 $1\mu\text{T}$ ，只有 GIL 能够不用昂贵的隧道屏蔽达到这个值。GIL 建成后在额定电流下的实测值为 $0.3\mu\text{T}$ ^[50]。

技术设计的更多细节见第 4 章。

2.2.2.4 世界首个直埋式第二代 GIL

为什么需要 400kV 直埋式混合气体 GIL？

法兰克福机场需要为满足不断增长的空中交通需要增加一条跑道。机场北部是最佳位置，但是一条 400kV 架空线和变电站挡在那里，解决方案是把架空线改造为地下 1km 的系统并把变电站改到户内使用 GIS^[226]。

每个系统输送的功率为 1800MW，这条线是南北输电线的一部分。这么高的额定功率要求把每回架空线系统改为两回地下电缆系统或一回 GIL 系统，两回架空线系统就需要改为四回地下电缆系统或两回 GIL 系统，并且需要相当大的空间。经过对经济、运行、可靠性和维护诸方面的评估最后选定使用 GIL。

克尔斯特巴赫直埋项目的技术参数见表 2. 10。

表 2. 10 德国克尔斯特巴赫项目的技术参数

型式	数值
额定电压	380kV
最高电压	420kV
额定电流	2500A
雷电冲击耐受电压	1425kV
操作冲击耐受电压	1050kV
工频耐受电压	630kV
额定短时电流	50kA
额定气压	8bar abs.
绝缘气体	80% N ₂ /20% SF ₆
输电容量	1800MVA

1800MW 的输送电力经过套管进入 GIL，一端与机场外的架空线连接，另一端与机场的 GIS 连接。变电站与机场相连并且是南北长距离输电线的一部分。

图 2. 19 是克尔斯特巴赫项目总体布置图。

图 2. 19 的路线表明当选择了地下解决方案时，肯定不是直的，总是会有弯曲和转角的理由。在图 2. 19 的左上角架空线架构上两回三相系统被集中起来再通过 90°转角模块向右进入地沟。在整个 1km 的路线中向右弯然后再向左弯形成一个长的“S”形，在地沟的另外一端有 30°转角模块把两个 GIL 系统引入气体绝缘变电站。

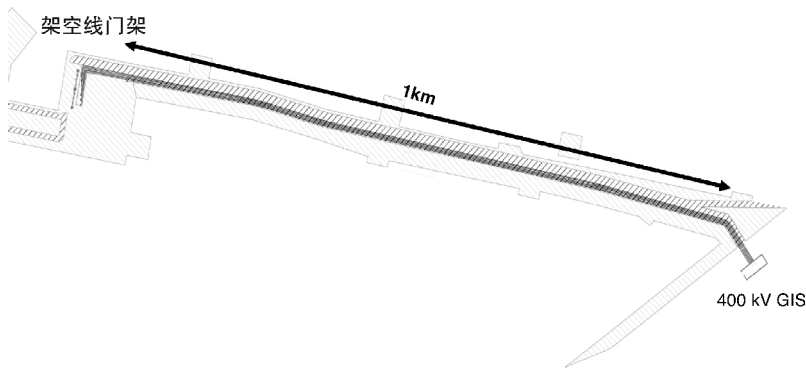


图 2. 19 克尔斯特巴赫项目总体布置图（由 Siemens AG 授权提供）

图 2. 20 给出了这条线路更清晰的图。

图 2. 20 是地沟中 6 根管子里已经敷设好两根的情况，可以看出弯曲半径在 400m 以上的右弯和左弯。

在乡村敷设直埋 GIL 时不仅需要左右弯曲，还需要满足垂直方向的弯曲。最终结果是 GIL 在地形中的弯曲是一条空间曲线。这可以在图 2. 21 中看到。

在图 2. 21 中也可以看到现场施工帐篷，这个帐篷放在 GIL 地沟上面。GIL 在施工帐篷（图中央）里面一段一段进行预装配然后焊接成 1km 长单气室的输电线。



图 2.20 克尔斯特巴赫项目施工鸟瞰图（由 Siemens AG 授权提供）

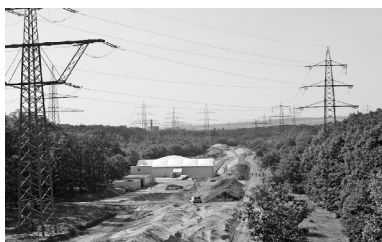


图 2.21 克尔斯特巴赫施工现场图（由 Siemens AG 授权提供）

地沟深度中值为 2m，最小覆土厚度为 1m。要求管道之间最小距离为 0.5m 以消除管道之间的热影响并让出维修空间。整个地沟宽度为 6m，图 2.22 是地沟截面图。

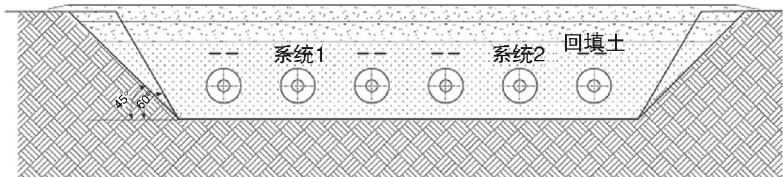


图 2.22 沟渠中两个 GIL 系统截面图（由 Siemens AG 授权提供）

地沟用不含石头的土壤回填，GIL 周边用沙和粘土覆盖以得到更好的热传导性能。在图 2.23 我们可以看到在被回填材料覆盖之前的 6 根管道。

克尔斯特巴赫项目证明了现场装配概念和在土壤中直埋的方式成功实现了。高达 1800MW 的输送容量使 GIL 成为有力的技术解决方案，投入运行时间为 2012 年，第 4 章会给出更多技术信息。



图 2.23 回填前沟渠中的 6 个 GIL 管（由 Siemens AG 授权提供）

2.2.3 全球范围的经验

SF_6 在同样气体压力下的电气绝缘能力是空气的三倍，由于 SF_6 的高负电性、特殊放电性能以及捕捉自由电子的能力使得 SF_6 可以用于高压设备的设计。气体绝缘高压设备的紧凑设计和较少的对空间的要求是和 SF_6 的这些能力有关的。 SF_6 具有不燃、惰性并且有较高的化学和热稳定性。 SF_6 在处理得当，如遵守 IEC62271 - 4

标准时对人是无害的^[51]。

SF₆ 气体绝缘高压设备最早在 20 世纪 60 年代制造于美国，然后是欧洲。20 世纪 60 年代就有设备安装，首个 GIS 于 1968 年在德国投入运行。

最初的气体绝缘设备用于 100kV 额定电压，但是很快就相继达到更高的电压等级，SF₆ 绝缘设备达到 550kV。

1975 年，第一条使用 SF₆ 的气体绝缘输电线安装于施卢赫湖山洞水电站，是一座调峰抽水蓄能电站，这条 GIL 在 400kV 额定电压下工作，在发电模式时向电网输送高峰负荷电能，在夜间负荷低时抽水。

气体绝缘输电线在全球应用已经有 35 年以上，电压范围从 145 ~ 550kV。两种类型的装配方式都有应用：法兰连接的 GIL 和焊接连接的 GIL。法兰连接的 GIL 使用法兰和螺栓以及密封件来连接输电线的单个段。焊接连接的 GIL 使用轨道焊接来连接这些段。这两种系统加在一起，全世界已经安装了 300 多 km，经 35 年以上的运行至今尚无重失效的报道。

至今为止 GIL 的典型应用有电厂内变压器和开关设备的连接，或山洞电厂内变压器和山洞或隧道以外架空线的连接。GIL 也用于连接 GIS 和架空线，或者用作气体绝缘变电站的母线。这些应用已在不同的天气条件下实施，从加拿大的低温到沙特阿拉伯和新加坡的高温环境，或者是在南非海岸的含盐空气和欧洲山区的重冰载荷。GIL 输电系统和环境条件无关，因为高压系统完全封闭于金属外壳以内。

第二个项目建在泰国的曼谷，用于 550kV GIS 和架空线的连接，第三个项目建在印度德里，用于水电站山洞里的 400kV 变压器与山外面架空线的连接，这是典型应用，参见第 7 章^[52]。

至今第二代 GIL 的经验——2001 年的瑞士的 PALEXPO 项目，2002 年的泰国曼谷的柿莲项目，2004 年印度的德里项目——这些项目都很正面。这些 GIL 使用 N₂ 和 SF₆ 的混合气体作为绝缘介质。

作为结论我们可以说过去 40 多年气体绝缘输电线的经验是非常正面的，在 800kV 以下所有电压等级，额定电流达 8000A，短路电流达 100kA 共安装了 300km 以上的 GIL 表明它可以可靠地完成大容量输电。铝管、环氧树脂绝缘件和稳定、不老化的绝缘气体或混合气体组成的简单的基本设计是根本原因^[52,53,201,203]。

预计在未来输电网随着可再生能源变化，GIL 会起到主要作用。

第 3 章 技 术

本章内容覆盖了各个设计问题：介绍了气体绝缘技术的物理基础和原理，给出了 GIL 之所以成为大容量甚至是长距离输电最佳方案在各个设计标准上的原因。

本章解答了以下问题：

什么是最好的设计标准？

GIL 的基本设计标准如下：

- 1) 额定电压下的电场强度；
- 2) 导体和外壳的最高温升；
- 3) 外壳在气体压力和外来负荷作用下的机械强度；
- 4) 包括短路电流的电动力。

如何证明功能和质量？

必须进行以下试验来证明 GIL 的制造和安装完成后能达到要求的功能和质量：

- 1) 高电压试验；
- 2) 额定电流试验；
- 3) 短时电流试验；
- 4) 内部电弧试验；
- 5) 机械试验；
- 6) 振动试验；
- 7) 发热试验；
- 8) 局部放电试验；
- 9) 气密性试验；
- 10) 导体电阻试验。

表 3.1 电压水平

额定电压水平/kV	110	220	345	380	500	735
设备最高电压/kV	123	245	362	420	550	800
工频耐受电压/kV	230	460	520	630	710	960
雷电冲击耐受电压/kV	550	1050	1175	1425	1550	2100
操作冲击耐受电压/kV	NA	NA	950	1050	1175	1425

这些试验属于设计试验或型式试验，用来验证 GIL 的设计是正确的。GIL 的制造和安装需要通过所谓的生产或例行试验来验证。生产和例行试验在工厂或现场进行，以验证工厂制造和现场安装的正确性。为了验证模拟寿命的质量和功能还要进行长期试验，长期试验是为了模拟 50 年的使用寿命，长期试验通过高电压和大电流来模拟老化效应。

GIL 如何和电网相结合?

为了研究 GIL 和电缆、架空线等并联或串联运行的兼容性需要研究这些规划问题。

在核对 GIL 与特定的电网条件下的功能时, 需要研究 GIL 自身的可靠性以及它和电网的连接、接地、接触电压、安全、环境影响及限制、相位角补偿、载荷及过载能力以及绝缘配合问题。

GIL 在系统中的设计主要取决于输电额定值的要求, 输电额定值包括额定电压和额定电流, 这些额定值必须和电网参数相匹配。本章内容集中在与 GIL 有关的标准和问题并评价其在某些要求下的优点和弱点。

本章也对与其他输电技术作了比较以给出选择正确技术的准则。

GIL 技术在 110kV 到 800kV 间的所有电压等级都有应用。出于大容量输电的要求, 大部分 GIL 是应用在 420kV 到 550kV 这些较高的电压水平。如表 3.1 所示, 工频、雷电冲击、操作冲击等试验电压与绝缘配合有关。

最大磁场强度取决于额定电流以及测量点与 GIL 的距离。由于外壳中存在反向电流所以在数米处的场强低于 $1\mu\text{T}$ 。

GIL 的设计根据国际标准 62271-204 “额定电压 72.5kV 及以上气体绝缘刚性输电线路^[54]”。该标准规定了技术要求和试验程序^[55]。

3.1 气体绝缘

在第 2 章我们介绍了气体绝缘系统作为电网解决方案在开关 (GIS) 和输电 (GIL) 方面过去年间的发展。GIS 是由于其良好的开断能力, GIL 是由于其良好的输电能力。两种技术都被证明运行很可靠^[56]。

目前, 设备的短路开断能力已经达到 80kA 的短路电流, 个别情况达到 100kA。电压水平达到 800kV, 其中大部分是 420 ~ 550kV。典型的额定电流为 3000A, 某些情况下达到 8000A。

GIL 的气体绝缘系统由支持绝缘子、气密绝缘子、导体、铝合金管材外壳以及绝缘气体组成。最基本的设计准则是自由气体空间。在管材导体和管材外壳组成的 GIL 中, 该自由空间是圆柱体。

GIS 和 GIL 的 SF_6 绝缘已经广为人知了, 很多出版物有介绍。 SF_6 绝缘气体的知识基础也用于混合气体绝缘。在寻找 SF_6 气体的替代品时很多气体得到研究并被证实是可以用在高电压条件下, 但是至今尚未找到能够在绝缘能力、无毒、价格合适几方面完全代替 SF_6 在高压开关设备应用的其他气体^[51]。

SF_6 气体属温室气体, 生态学观点要求 SF_6 从生产、使用到最后降解为非关键气体全过程闭环。国际标准对 SF_6 气体的处理有规定^[51, 58]。

绝缘气体成本成为另外一方面的考虑。 SF_6 比 N_2 要贵得多, 但是相比 N_2 它有

两个优点：高灭弧能力和高绝缘能力。

由于 GIL 没有开断功能，所以 SF_6 的高灭弧能力在这里是不需要的，而 SF_6 的高绝缘能力可以部分地由提高气压的 N_2/SF_6 混合气体来补偿，这样就使得 N_2/SF_6 混合气体 GIL 更具成本优势。

有很多人对 N_2/SF_6 混合气体降低的灭弧能力做了研究并在多个院校发表^[59,60]，但是当时 N_2/SF_6 GIL 的设计知识还不够充分以至于不能设计出可靠的 N_2/SF_6 GIL。因此有必要建造实际尺寸有代表试验装置作为 GIL 的样机来验证设计计算和实验室试验。

第 4.8 节对样机试验装置的研究结果作了介绍。

3.1.1 自由气体空间

为什么气体绝缘高压设备取得了成功呢？

答案是气体绝缘的物理特性。气体在给定空间均匀分布，气体分子通过气体对流持续运动。理想气体的第一气体定律说明气体是均匀分布的：“任何气体或混合气体的分子在给定空间是均匀分布的。”实际气体的分布在给定空间遵守麦克斯韦分布，允许与理想气体的分布有差异，该差异的影响很小，可以被设计公差所覆盖。

气体运动的“马达”是局部气压，也就是气体空间不同区域的压力差，该压力差是由气体的温度差来推动的。有了这个“马达”，气体分子就不断地运动，通过这些运动电荷也不断运动并混合。

因此，GIL 的绝缘机制和架空线相似，空气在架空线系统是起气体绝缘作用的。GIL 就象是外壳包裹的架空线。

自由移动气体分子的优点是电荷无法固定在某一点上。作为绝缘气体的 SF_6 气体分子由于其电子引力而可以捕捉自由运动的电子。GIL 的设计尺寸很大，额定电压 550kV 的直径为 500mm，相应使得绝缘气体中的电场强度很低，在大部分区域的平均值为 4 ~ 6kV/mm。

在液体绝缘中，比如油，它的绝缘场强通常比气体高，分子的自由运动就不像气体分子那样了，就会非常慢，这时就要非常小心避免油中的颗粒。由于油的相对渗透常数高（典型的 $\epsilon_r = 5 \sim 6$ ），绝缘能力强，因此电场强度增加到 25 ~ 30kV/mm，420kV 油电缆的直径在 100mm 范围。

在固体绝缘中没有分子的自由运动，因此固体绝缘电缆中几微米的颗粒和空隙都是不能接受的。固体绝缘的场强又降到 $\epsilon_r = 4 \sim 5$ 在 20 ~ 30kV/mm 范围，固体绝缘电缆的直径与油电缆相近。

GIL 中导体和外壳之间的自由气体空间是圆柱形的，尺寸较固体绝缘要大。99.9% 以上的 GIL 是圆柱形的气体空间，可以得到稳定的绝缘和高可靠性，且没有老化效应。用于 GIL 的气体在电气和热上都是不老化的。世界范围 GIL 的经验表

明，一旦 GIL 成功通过了现场试验并在额定电压投入运行，它的绝缘是不会失效的。

GIL 是不带任何开关和开断功能的气体绝缘系统，自 1974 年发源以来没有重失效的报道。这是好消息，也表明了像 GIL 这样的气体绝缘系统的高可靠性。

图 3.1.1 示出了 GIL 的内视图。



图 3.1.1 GIL 的内视图
(由 Siemens AG 授权提供)

3.1.2 绝缘件

导体需要被固定在外壳的中心以使得同心管道系统的电场能够均匀分布。绝缘件通常用环氧树脂和填料制成，目前有两种填料：氧化硅（细砂）和氧化铝（ AlO_3 ），两种填料的任务都是为环氧树脂在模具中成型时给绝缘件必要的机械强度。目前用于气体绝缘设备的环氧树脂有若干配方，不同配方的要求来自机械强度、最高许用温度、电气绝缘性能、表面放电敏感度以及表面电蚀耐受性。

对于 GIL 的应用来说，最高温度和放电电蚀耐受性是主要特性，而机械强度和电气绝缘是不重要的。

气体绝缘开关设备的绝缘件的机械强度更高，除了气体压力以外还要承受断路器和开关操作很强的冲击力。

绝缘材料的电气绝缘能力没有全部用到因为尺寸（外壳直径）是由绝缘气体的自由气体空间设计来决定的。

和气体相比，GIL 用的环氧树脂的绝缘能力是在 $\epsilon_r = 3 \sim 5$ 的范围，这意味着绝缘件是在它物理绝缘能力的 $3 \sim 5$ 倍以下运行，裕度很大。这个设计特性也是 GIL 具有高度运行可靠性的另一个原因。

目前使用的绝缘件有三种：

- 用来把导体固定在外壳中心的有一个、两个或三个脚的支柱绝缘件。
- 锥形绝缘件，沿导体同心、有孔，用来把导体固定在外壳上。
- 气密锥形绝缘件，沿导体和外壳同心、没有孔，用来分隔气室并把导体固定在外壳上。

3.1.3 气密外壳

为什么 GIL 的气密性如此重要？

GIL 的高气密性有两个理由，首先系统不能漏气，因为要保证高电压下的绝缘并持续运行，第二，如果没有气体损失，也就不会有来自环境对内部高压系统的影响。如果没有东西出来，也就不会有东西进去。除了灰尘和所有类型的颗粒外，微量水份对高压绝缘也是非常重要的，绝缘气体需要大气压下露点为 -20°C 及以上。

露点 -20°C 使得绝缘气体非常干燥。即使 GIL 气室存在过压力，水份还是会进

入气室，气室内的水份会降低绝缘能力，导致的后果是内部放电。因此，50 年的期望使用寿命需要高气密性，气密性是通过 O 型密封圈和焊接连接实现的。现场焊接需 100% 经超声试验检查来保证气密性。

自动轨道焊机形成多级焊缝来连接外壳管道，根据壁厚需要 5 ~10 层的焊缝来形成一个连接，这样可以避免在铝中形成气孔造成漏气。图 3.1.2 示出了这种多层焊缝的截面。图 3.1.3 示出了自动轨道电弧焊工艺的设备。

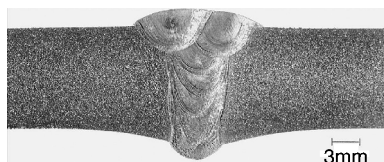


图 3.1.2 多层焊缝的截面
(由 Siemens AG 授权提供)

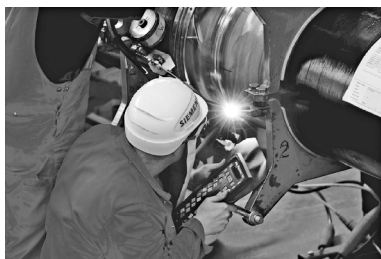


图 3.1.3 轨道电弧焊接工艺
(由 Siemens AG 授权提供)

外壳材料为铝板或挤制型材，为提高机械稳定性还使用铝合金，两种材料由于其分子结构特性都是气密的。铝板是用厚板材经高压压力轧制到典型厚度 5 ~ 10mm，在高压压力轧制下铝材形成了均匀的结构因而是气密的。铝板通过轧制形成管材，板材或卷材通过纵向焊接（见图 3.1.4）或螺旋焊接（见图 3.1.5）连接起来。

挤制铝管是用铝棒用挤压设备挤制成无缝管材，材料的结构是纵向均匀的并且形成气密管。



图 3.1.4 纵向焊接管
(由 Siemens AG 授权提供)



图 3.1.5 螺旋焊接管
(由 Siemens AG 授权提供)

3.1.4 绝缘气体

什么是合适的绝缘气体？

空气绝缘系统中最初用于高压绝缘的气体是周围的空气，随着金属封闭高压系

统的开发,开始使用工业空气(含 O_2 的 N_2)来使得这些气体更独特,后来又用氦气(He)和氩气(Ag)等惰性气体作为添加剂来改善绝缘性能,但是它们又昂贵又难于处理。1920年人们设计了人工气体六氟化硫(SF_6)用于化学,主要是用来排除模具中的氧气成为化学反应的抑制剂。20世纪60年代,绝缘和灭弧等电气性能被用来设计第一个电气系统。在GIL中,因为GIL的目的仅仅是电力的输送所以不需要开合操作,因此GIL中只需要用到 SF_6 的绝缘能力。

SF_6 比 N_2 和干燥空气都要贵,GIL需要大量的绝缘气体,1km长8个大气压的GIL需要 $500m^3$ 的气体。由于成本以及只需要绝缘性能而不需要开合性能的原因人们开始使用80%的 N_2 和20%的 SF_6 的混合气体。

N_2 和 SF_6 气体混合使用已经有很长的历史,早在20世纪70年代,开关设备超低温应用时人们就用 SF_6/N_2 的混合气体来降低液化值到 $-30^\circ C$ 。 N_2 和 SF_6 一样属于惰性气体,化学反应潜力低,因此用于高压设备非常好。即使 SF_6 的含量很低(如10%~20%), SF_6/N_2 的混合气体仍然有很好的高压绝缘性能。一个原因是纯 SF_6 的电晕稳定效应的特性,该电晕稳定效应解释了 SF_6 捕捉自由电子并在极不均匀电场(如导体表面尖端或划伤的周围)形成电晕云的能力。 SF_6 有这个电晕云就能够修复失效,这意味着高场强区极不均匀电场中发射到气体中的电子被 SF_6 分子捕捉到并放出光子,众多光子就形成电晕云。不均匀电场通常是导体表面划伤等小的失效,它们产生高场强并放出电子。当然修复失效是有限度的;高压系统的表面质量是很高的。

SF_6 分子具有多个能量级的复杂结构和它带来电晕稳定特性的负电性是 SF_6 用于GIL和GIS的原因,这些特性也提供了全寿命运行的高可靠性。因为在实际制造和安装中,理想的表面和形状只能通过给定的公差来实现,作为绝缘气体的 SF_6 对高压系统处理质量偏差有帮助。

干燥空气或工业空气(N_2 、 O_2)可能是绝缘混合气体的另外的实际备选方案,但是与 SF_6 相比要接受绝缘能力的损失,这会导致更大的尺寸或降低额定电压50%。还有很多其他含或不含 SF_6 的气体可以用作混合气体。氦气(He)或氩气(Ag)等惰性气体是一个气体家族,但是它们会比 SF_6 更贵,绝缘能力反而差,完全没有灭弧能力。氯化烃(CHC)也是可能性之一,但是在实际高电场强度下使用会在气体中产生碳丝(碳微粒),这在高压设备中是不能接受的,这些碳丝在GIL中会产生放电。

所有这些导致 SF_6 、 N_2 、干燥或工业空气成为实际的可能性。 SF_6 和 N_2 混合时绝缘能力和 SF_6 和 N_2 的比例之间的关系随后用图3.1.6表示。干燥空气(75% N_2 ,23% O_2 和2%其他气体)的混合物和工业空气(80% N_2 ,20% O_2)与 N_2/SF_6 混合气体的结果类似,但是绝对绝缘能力水平低,结果是尺寸增大,这些是这些混合气体迄今未能广泛应用的原因^[61]。

3.1.4.1 SF₆

SF₆ 绝缘气体在高电压下使用有两个基本优点：

- 由负电性得到的高绝缘能力；
- 由再复合和电弧冷却得到的高灭弧能力。

对 GIL 来说灭弧性能是不需要的，因此用氮气（N₂）的混合气体可以使用而且并未失去太多绝缘能力，如 3.1.4.3 节解释，人们选择了 20% 的 SF₆ 和 80% 的 N₂。

SF₆ 的化学/物理性能如下：

- 不燃；
- 无色无臭；
- 无毒；
- 不溶于水；
- 比空气重 5 倍；
- 化学和热稳定性高；
- 储热能力强，允许用于密闭压力系统。

SF₆ 的电性能如下：

- 高绝缘能力；
- 高灭弧能力。

SF₆ 是一种具有高全球变暖潜能（GWP）的工业气体，只能在特定气体处理程序下使用，国际标准和欧盟 F - 气体规定有详细描述^[51,58]。

3.1.4.2 N₂

氮的分子结构是稳定的。N₂ 也是惰性气体，这意味着它不是非常活跃会与其他分子发生化学反应的分子。N₂ 没有负电性，这意味着自由电子不会被它的分子束缚，在很低的能级可能实现。N₂ 的来源是很丰富的，可以很容易地用空气来生产，因此价格很低。与 SF₆ 相比，N₂ 的分子要小三倍且 N₂ 没有负电性，也就是说它不会像 SF₆ 一样捕捉电子。在不均匀电场强度条件下电子在气体中被加速且不会被 N₂ 阻挡。体积小使得分子间有很多间隙，这样电子可以自由运动。没有负电性又不能在气体中捕捉电子并放出光子。SF₆ 会更好地完成阻挡并束缚自由电子的任务，一个大的硫分子和 6 个氟原子阻止了电子的自由运动，去掉动能，束缚电子并放出光子。我们能看见的光子就形成了所谓电晕，电晕就是高电场区域高电压导体的发光效应。

N₂ 与 SF₆ 一起可以设计出经济的高压输电系统 GIL，N₂ 的低绝缘能力在高电压应用时会导致很高的气体压力，因此在实际应用中 N₂ 绝缘系统仅限于 100kV。与 20% SF₆ 和 80% N₂ 的混合气体只需要 0.8MPa 直径 0.5m 相比，高电压等级如 420kV 或 550kV 要求直径大到 1m，气压高到 15bar 到 20bar。这么大的直径和气压会

使 GIL 设计的成本非常高,在这些高电压等级交流运用中还没有用过纯 N_2 的绝缘。

3.1.4.3 N_2/SF_6 混合气体

3.1.4.3.1 混合气体的原理

自从 20 世纪 70 年代前期关于代替 SF_6 就作了很多的研究。有一些试验混合气体的绝缘能力比 SF_6 还高,但是所有这些气体在毒性以及高电场下局部放电或电弧产生的分解物方面更危险,所以不推荐在高压设备中广泛使用这些混合气体。在一些国际出版物中对这些研究工作作了总结^[62,69]。

我们知道目前还没有以开断为目的的 SF_6 的替代物^[59,73],但是有以绝缘为目的的纯 SF_6 的替代物: N_2 加入少量 SF_6 的混合气体。GIL 需要大量的气体仅仅用于绝缘目的,所以推荐使用这种以 N_2 为主加上尽可能少量的 SF_6 气体这种混合气体。为了确定 SF_6 的比例需要对 SF_6 含量、气压以及壳体外径之间的比例进行优化, N_2/SF_6 混合气体的特性说明在 SF_6 含量小于 20% 时,同样气压下可以达到纯 SF_6 70% ~ 80% 的绝缘能力^[70,218]。

绝缘能力

20 世纪 70 年代以来的研究表明 N_2 和 SF_6 可以在高电压应用中使用,少量的 SF_6 含量可以使电压耐受能力增加很多,这使得长距离 GIL 减少 SF_6 的用量得以实现^[70-73]。

使用 N_2/SF_6 混合气体的 GIL 的尺寸基于理想的试验装置,在 N_2/SF_6 混合气体的限定条件和气压下,高压冲击耐受电压和相关的电场耐受强度极限得到确定。

为了测量的目的使用了 500mm 外壳管和 120/190mm 的导体管组成的同轴圆柱场,研究了压力范围从 0.1MPa ~ 0.7MPa,含 0% ~ 20% SF_6 的混合气体。

雷电冲击电压水平取决于气体压力,对不同的混合气体来说 SF_6 和 N_2 的关系呈现非线性现象。当气压增加时, N_2/SF_6 混合气体的非线性现象和纯 SF_6 相同。对操作冲击电压来说可以看到同样的趋势。基于这个曲线,可以选出不同的 N_2 和 SF_6 的混合气体的气压来达到同样的电压耐受水平。0.5MPa 20% SF_6 的混合气体和 0.7MPa 10% SF_6 的混合气体可以达到 0.3MPa 纯 SF_6 的耐受电压。这些压力值是最低工作气压,根据压力容器标准定义的最高气压为 0.7 ~ 0.8MPa^[70]。

纯 N_2 绝缘要求气压达到 2.0MPa,这会导致非常昂贵的压力容器设计。纯 N_2 方案不是一个实际的方案,但是可以在混合气体研究中作为指导值。

纯 N_2 的测量显示出工频电压、操作冲击电压和雷电冲击电压的特性有很大不同,仅含 5% SF_6 的 N_2/SF_6 混合气体就给出更稳定的试验结果,和纯 SF_6 的性能很接近^[70]。

最佳点设计

在含 20% SF_6 和 80% N_2 的 SF_6/N_2 混合气体中,绝对绝缘能力可以达到纯 SF_6 的 80%。这意味着只需要 20% 的 SF_6 体积含量,420kV GIL 就可以设计成适度的 0.8MPa 气压和可以接受的 500mm 直径。

当混合气体 SF_6 含量减少时，GIL 的设计点会移到电压耐受曲线的台阶区域，这意味着少量的 SF_6 含量变化（如从 5% ~ 6%）会导致绝对电压绝缘能力的较大变化，不是一个好的基本设计点。

当 SF_6 含量达到 20% 时，曲线变平，此时少量的 SF_6 含量变化不会导致混合气体绝对绝缘能力的较大变化，这也就是实际应用中 SF_6 含量确定在 20% 左右的原因。

慕尼黑技术大学高压研究所和西门子柏林高压试验室分别用实际尺寸的试验装置对 N_2/SF_6 混合气体的性能进行了长期测试。测试结果表明， N_2/SF_6 混合气体的主要性能和纯 SF_6 的良好电气性能基本一致，包括电晕稳定效应。测试结果表明，即使很少的 SF_6 含量也会强烈地增加混合气体的绝对绝缘能力。含 20% SF_6 的 N_2/SF_6 混合气体可以达到纯 SF_6 70% 以上的绝缘能力。

标幺特性

N_2/SF_6 混合气体的特性和优点已经研究了 40 年以上， N_2/SF_6 混合气体的用途曾经仅限于抵达 -50°C 的低温应用来防止 SF_6 液化。首次实际应用是第二代 GIL，驱动力是减少长距离应用的成本。

N_2/SF_6 混合气体的处理需要一个标幺评估工具来确定合适的压力、混合比和体积^[61]。

低 SF_6 浓度的 N_2/SF_6 混合气体已经具有高的电气绝缘强度，因为两种气体结合在一起有独特的协同物理性能。 N_2/SF_6 混合气体的标幺特性如图 3.1.6 所示。

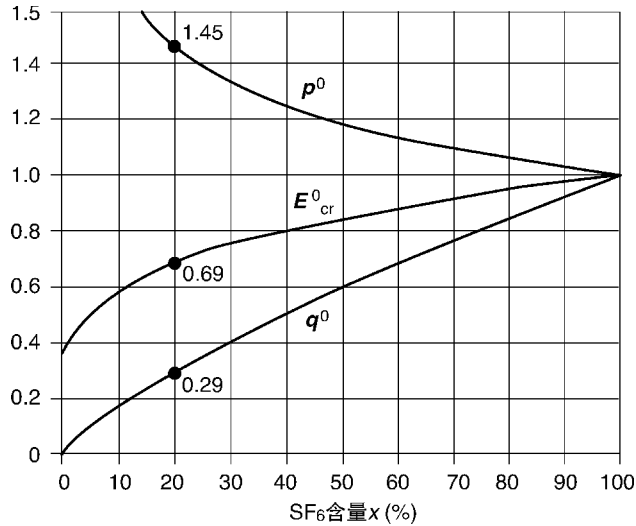


图 3.1.6 N_2/SF_6 混合气体的标幺特性（由慕尼黑技术大学授权提供）

图 3.1.6 给出了 3 条 N_2/SF_6 混合气体基于 100% SF_6 的电气强度曲线，图中显示以下结果：

- 标幺固有电气强度 E_{cr}^0 。纯 N_2 的 E_{cr}^0 值为 0.4，20% 的 SF_6 含量就把这个值改善到 0.69，纯 SF_6 的值是 1。

• 相同绝缘强度要求的标幺压力 p^0 。含 20% SF_6 的混合气体的 p^0 值为 1.45，意味着压力比纯 SF_6 高 45%。曲线在低 SF_6 含量时增长非常强劲，纯 N_2 可达到系数 3。

• SF_6 标幺量 q^0 ，曲线 q^0 表明混合气体中 SF_6 量几乎呈线性增加， SF_6 含量 20% 的值为 0.29，意味着与纯 SF_6 相比这种混合气体只需要 29% 的 SF_6 。为达到与纯 SF_6 相同的电场强度只需要适当增加压力 40%，但是混合气体中 SF_6 要少 70%。

N_2/SF_6 混合气体已经在一段时间内被认为是纯 SF_6 的潜在替代物因而进行了很多相关的研究工作，但是已出版的结果只是一些理想条件下小型实验装置验证的基本物理特性及数据。实际 GIL 要按要求达到绝缘能力实现可靠运行还需要进行很多进一步的研究。

内部电弧导致的压力升高

N_2/SF_6 混合气体内由于内部电弧导致的压力升高高于同样绝缘强度的纯 SF_6 ，但是 GIL 设计的气体容积非常大，最终压力升高被限制在远低于破裂临界值的值。 N_2/SF_6 混合气体内部电弧的截面也远大于纯 SF_6 ，因此在弧根向外壳的热能流的密度很小，因此在混合气体中发生内部电弧时外壳的烧蚀非常小。GIL 即使在自动重合闸条件下发生内部故障也不会发生外壳烧穿或外部效应^[61]。

N_2/SF_6 混合气体在过去很多年已经在世界上极低温地区用于高压开关设备，效果非常好^[74]。

水分

在气体绝缘系统中，水分对可靠的绝缘能力起主要作用。用于高压系统露点低于 -20°C 的干燥气体是非常干燥的。在存在水分的情况下，气体的绝缘能力会降低，GIL 会达不到全电压水平。

为了避免气室中的水分，使用的气体是用工业手段干燥并储存在气瓶中的。绝缘材料（如树脂浇铸绝缘子）在生产之后也在干燥条件下保管，在生产和使用于气体绝缘系统中间的时间短，这减少了水分在材料中的侵入，气室在充入绝缘气体之前是通过用 N_2 进行压力试验干燥的。

气体绝缘系统的密封系统是气密的。这是清楚的，但是它也必须是水密的。由于外部水分和内部干燥绝缘气体的巨大差异。水分的“压力”一直存在于密封圈周围，当前高质量的 O 型密封圈被用来保证绝缘气体的干燥。

当连接面为焊接时，焊缝需要防水，这在焊缝气密即可实现。焊缝的气密性是通过 100% 超声波试验来检查的，如检查出气孔，还需进行额外的 X - 射线焊缝检查。为了保证气体绝缘系统整个寿命周期保持低水分，还需要在气室中放置干燥材料。

3.1.4.3.2 验证试验

为了验证混合气体的绝缘性能，制作了几个实际尺寸的和条件的原型试验装置。

原型试验装置是实际尺寸的试验装置，包括所有要求的 GIL 元件以满足高电压下的输电功能。原型试验装置研究的目的是有以下几个方面：

- N_2/SF_6 混合气体的关系；
- 气体压力；
- 绝缘件、导体和外壳的表面；
- 试验电压；
- 潜在的低级不均匀性。

同轴圆柱电场的典型尺寸是 400mm 和 500mm 的外壳和对应的 120mm 和 190mm 的导体管用来形成自由气体空间来避免端部和绝缘件处的非同轴圆柱电场条件的影响。

试验装置的元件具有标准的制造质量和理想的表面结构。工频、操作冲击和雷电冲击试验电压的一般要求见表 3.1.1。

表 3.1.1 额定耐受电压

雷电冲击耐受电压	18% SF_6 1425kV
	13% SF_6 1300kV
操作冲击耐受电压	18% SF_6 1050kV
	13% SF_6 950kV
工频耐受电压（有效值）	18% SF_6 630kV
	13% SF_6 520kV

在试验装置上不仅进行了理想的测试，还用局部放电测试技术对事故的影响作了研究。

用已知缺陷（如导体上的尖端以及自由移动颗粒）进行的局部放电测试表明：低 SF_6 含量的 N_2/SF_6 混合气体与纯 SF_6 中局部放电测试的区别很小。在幅值/相角/密度图上实际上是看不出区别的。这意味着纯 SF_6 的甚高频局部放电试验方法也可以用于 N_2/SF_6 混合气体。高电压试验相角测量表明， N_2/SF_6 混合气体和纯 SF_6 相比没有本质差异^[75,76]。

测试设备

不同的新开发的使用 N_2/SF_6 混合气体的 GIL 样机成功地进行了高电压试验，在高于额定耐受电压的试验中对光/声发射的监测极大地帮助了破坏性放电的定位。现场高压试验可以包括快速上升的冲击电压，对长度 1km 的典型试验段来说，计算出的最小有用的波前时间是 30 μ s。

原型试验装置 1

1994 年受法国电力公司（EDF）研发计划的推动，第一相第二代 GIL 实现了所谓的实验室样机。基本研究和高压试验结果选择了高 N_2 含量的 N_2/SF_6 混合气体作为绝缘气体，另有助于输送容量 3000MVA 的直埋 GIL 外壳直径 650mm 可选，如图 3.1.7 所示。

原型试验装置 2

第二个用于混合气体研究的原型试验装置安装了两次，第一次是在德国柏林西门子开关厂的高压试验室，第二次是在 IPH 试验室，也在德国柏林。

选择的混合气体是高 N_2 含量以及尽可能低 SF_6 含量的 N_2/SF_6 混合气体。由于各个设计参数之间有很多相互影响，需要一个优化程序来找到 SF_6 含量/气压/外壳直径以及设计温度的最佳组合。 N_2/SF_6 混合气体的基本特性表明，在 SF_6 含量小于 20% 时，稍微增加一点气压可以达到纯 SF_6 70% ~ 80% 的绝缘能力。图 3.1.8 是这个用于在高压试验条件下验证 GIL 设计的原型试验装置，这个试验装置包括了 GIL 的所有元件，长度约 30m，用 IEC 额定值进行了工频、操作和雷电冲击试验，结果证明系统是可靠的。

图 3.1.8 的试验装置包括在图左前部的隔离模块，连接了两段 12m 长的直线单元，在直线单元末端通过一个转角模块与高压试验套管相连，这个 30m 长的实际尺寸的试验装置用于验证实际运行条件的试验电压。

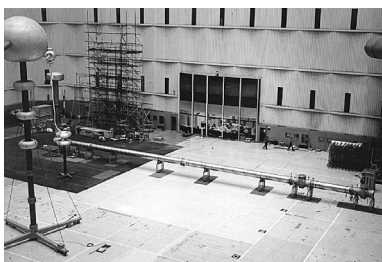


图 3.1.7 法国 EDF 实验室的样机试验装置（由 Alain Sabot 授权提供）

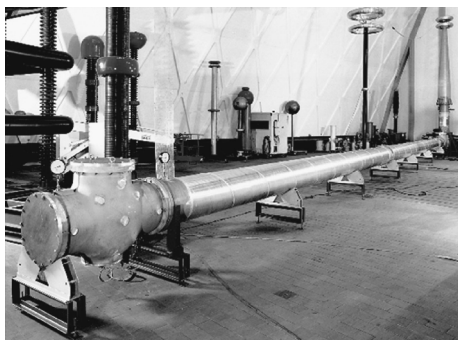


图 3.1.8 直线单元的高压试验（由 Siemens AG 授权提供）

通过 SF_6 和 N_2 不同比例的混合气体对绝缘件、导体、触头和滑动触头的影响来研究混合气体的可靠性并找到合适的气压和混合比。

考虑到当今生态和经济的要求，还是会提出寻找替代物的问题。 N_2 在环境相容性方面可以认为是绝对非关键的，因为它是自然存在的气体，在大气中以很高比例存在，因此 N_2 是合适的绝缘气体。尽管纯 N_2 绝缘对所需的绝缘水平会带来不理想的设计，但是通过加入一些 SF_6 可以达到就目前实际应用来说理想的绝缘能力。

关于灭弧能力 N_2/SF_6 混合气体是大打折扣的，在短路容量一再提高的情况下，结果是这种混合气体用于断路器是不合适的。这也是后面不再讨论断路器灭弧性能的原因。

20 世纪 70 年代和 80 年代很多研究单位对 N_2 和 N_2/SF_6 混合气体的绝缘能力作了研究，也提供了很多评估的思路。各种电压应用的 50% 击穿电压一般在小型

试验装置就确定了，这些结果指出了一些目前在大型装置上不是一直相关或有用的趋势和特质^[59]。

图 3.1.9 是这个试验装置的变化形态，除直线模块以外还在末端连接套管之前加装了 90°转向的转角模块。

这个试验装置的变化形态包括的转角模块代表实际 GIL 项目的转向模块，90°转向的转角模块在雷电冲击电压试验时对转角模块反射的高频暂态波有影响并叠加在试验电压上，在操作冲击电压试验时对低频暂态波有影响。

原型试验装置 3

第三个原型试验装置安装在慕尼黑大学和西门子柏林开关厂，都是在高压试验室。

这个试验装置与第一个和第二个都不一样，气室要小得多。大的气室需要更长的处理时间来排空到几个毫巴和充气。试验装置 3 用来通过大量测量数据来研究混合气体和实际尺寸的绝缘件得到统计安全裕度。

为了确定设计原则，用基本试验装置确定了放电和耐受电压。最初的试验装置由同轴圆柱电场（直径 120mm/400mm 和 190mm/400mm）和纯气体的段组成（见图 3.1.10），目的是排除固体绝缘件对结果可能的影响。

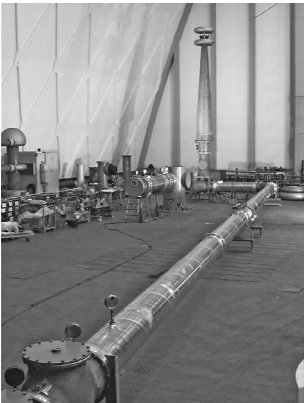


图 3.1.9 包括转角单元的直线单元的高压试验
(由 Siemens AG 授权提供)

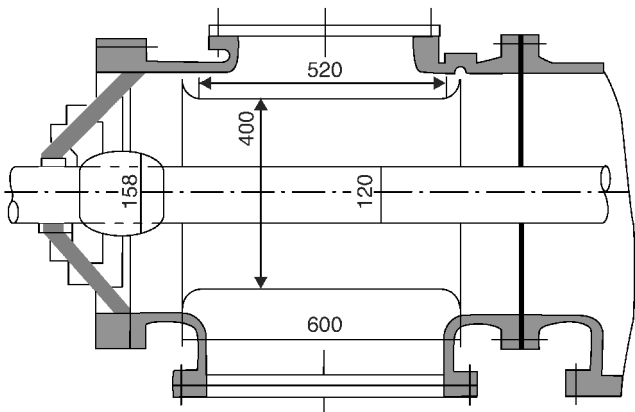


图 3.1.10 用于试验混合气体的试验装置 (由 Siemens AG 授权提供)

分析在 0.1 ~ 0.7MPa 压力范围内进行，N₂ 中 SF₆ 的含量一直分析到 20% 体积比。这两个范围是预先确定的，因为这些是混合气体绝缘 GIS 和 GIL 不会导致非理

想的大尺寸设计的理想范围。压力范围覆盖了目前配用承压外壳设计的 GIS 装置常用的压力值。绝缘强度取决于气压和 SF_6 的量，分析的气体混合范围表明 GIS 和 GIL 装置的几何设计选择余地很大。

因此，为了设计用“新”绝缘介质的 GIL，在实际尺寸试验装置上进行试验是必要的，目的是保证实际条件下运行的绝缘能力^[34]。

试验程序

气体的耐受能力用 50Hz 交流电压和两种极性的标准操作和雷电冲击电压来研究。确定的耐受电压是在每种情况下决定的，即可重复的不放电的最大可能耐受电压。

在工频电压试验中电压分几次升高到击穿电压，然后在击穿电压以下验证耐受电压。原则上确定最高冲击耐受电压的程序是类似的（见图 3. 1. 11）。

电压逐步上升直到击穿。在第一次击穿后，在击穿电压值的 3% 以下进行 15 次冲击没有击穿的耐受试验。最终达到的耐受值（15 次冲击无击穿）就作为最大耐受值。施加冲击电压之间的等候时间取数分钟来使气体再次稳定并使每次冲击具有同等测量条件。图 3. 1. 11 所示为操作冲击电压在 10% SF_6 0. 6MPa 确定耐受电压的程序。

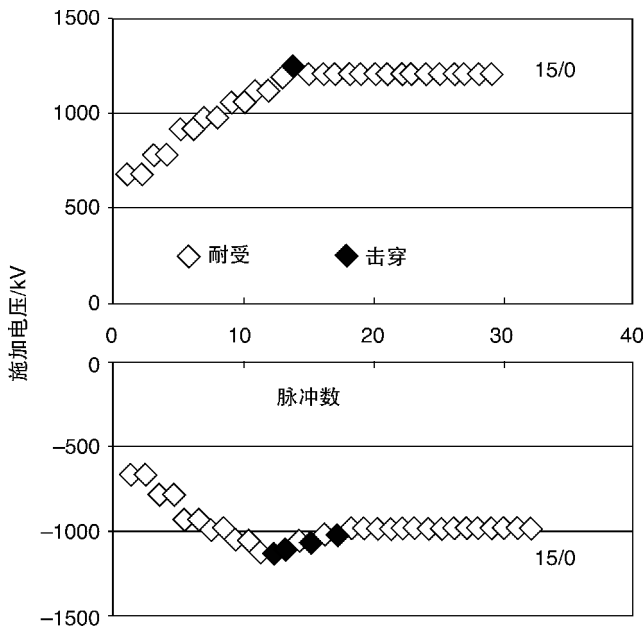


图 3. 1. 11 用于确定正极性和负极性最大耐受操作冲击电压的例子
(15 个脉冲无击穿) (由 Siemens AG 授权提供)

3. 1. 4. 3. 3 测试设备

高电压试验中确定破坏性放电的位置是重要的，气体放电产生光和声音信号，

两种现象都可以用来定位。

从观察窗检测光

用现成设备组成的以下系统可以实现一个屏幕上同时监测 4 个摄像头，还可以录像（见图 3.1.12）。

每个摄像头与电/光变换器连接，摄像头、变换器和电池装在金属外壳中（C1 到 C4），光缆把视频信号传送到光/电变换器（O/E），变换器与四路压缩器相连，再加上录像机（VR，带单幅回放功能）、监视器（M）和图像打印机（P）就组成了这套测试设备。控制室需要屏蔽，这样标准设备（与较贵的设备相比）就可以用了。

这套系统的先决条件是摄像头和压缩器可以检测到放电，这一点可以通过把全部摄像头和一个放电球隙相连，制造一个放电，然后检查每个摄像头是否检测到。

声脉冲定位系统

GIL 外壳内发生的绝缘击穿会产生声冲击波，该冲击波在 GIL 内以声的速度传播并可以被检测到，因此在试品外壳几个不同的位置测量声波到达的时间，通过对几个声波到达时间的比较就可以确定放电位置。

图 3.1.13 所示为系统方块图：几个声学传感器分布在试品金属外壳上，每个封闭的传感器都有电池，如果声音信号高于某个值就发出光信号，光信号经光纤传输通过光/电转换器进入逻辑分析仪，系统是电磁兼容的。逻辑分析仪和其他任何用于存储和记录的设备需要放置在电磁屏蔽室。

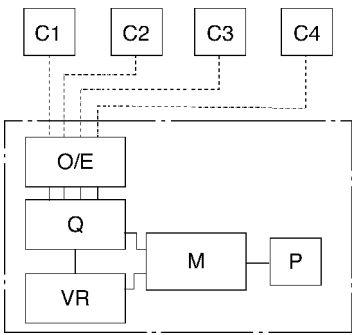


图 3.1.12 视频监测系统框图
（由 Siemens AG 授权提供）

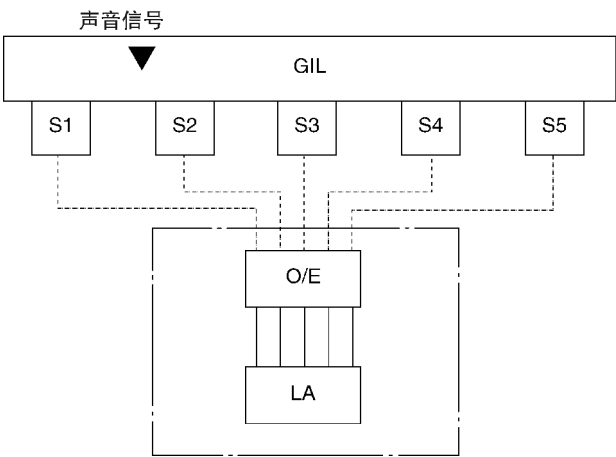


图 3.1.13 声脉冲定位系统框图（由 Siemens AG 授权提供）

第一个信号触发了全部二进通道，声音在外壳材料中的速度是每秒数千米，比电磁波（包括光波）的传播速度小几个数量级，因此光缆的长度对结果没有影响。

从以下典型的逻辑分析记录中（见图 3.1.14）可以看到细节：

- 声脉冲发生在靠近 2 号传感器的位置（比较图 3.1.13 中记号▼）；阶跃在时刻 T 触发了逻辑分析仪的全部通道。
- 其他传感器的阶跃发生延迟，放电和相应传感器之间的距离越长。

在试验开始之前用榔头敲一下外壳可以很简便地测试一下系统，在破坏性放电发生之后可以做一下校验，敲击放电部位可以产生与原始声脉冲类似的逻辑分析图形。

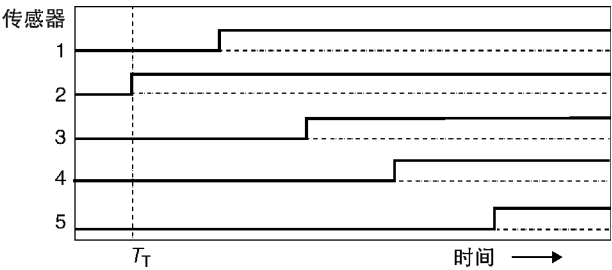


图 3.1.14 图 3.1.13 用▼记号指示的声脉冲图型（由 Siemens AG 授权提供）

3.1.4.3.4 试验结果

从确定的最高耐受电压计算得出对应的耐受电场强度成为新设计的基础。图 3.1.15 示出了气压 0.6MPa 时 SF₆ 含量与确定的耐受场强下不同电压（雷电冲击、操作冲击和工频）之间的关系。

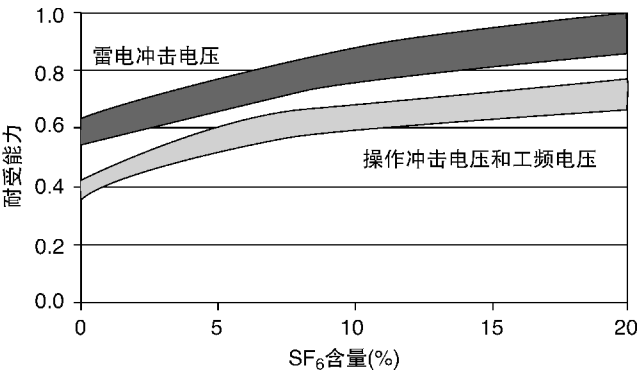


图 3.1.15 含少量 SF₆ 的 N₂ 绝缘中雷电冲击、操作冲击和工频最高耐受电压之间的比较（由 Siemens AG 授权提供）

结果中值得注意的是操作冲击值和交流电压峰值之间没有明显的差别，这样两种电压可以合并在一个分布范围。

总结不同压力和 SF₆ 含量得出的试验结果，以每个实测值的偏差为基础就形成

了对应的分布范围。试验装置的条件对这个分布起根本作用。这里的试验是在从工业工程的角度看来理想的表面和理想的剩余污染条件下进行的，在工业生产条件下应用这些结果也会得到这样的分布。上包络线可以看成是在最低粗糙度和没有污染的小表面可以得到的最高电压。运用这个范围取决于有关的应用，必须考虑表面条件、加压面的大小和可能的轻度污染。

文献中 N_2 著名效应可以被观察到，与 SF_6 相反，正极性值在负极性值之下，特别是在高压范围的雷电冲击试验时。该效应和基本设计工作无关，即使两种极性的证据都存在。这也是不需要作区别考虑的原因^[59]。

N_2/SF_6 和 SF_6 的比较

和纯 SF_6 不同， N_2/SF_6 混合气体的耐受能力和压力的依赖性不是很明显，图 3.1.16 是与 SF_6 相比不同混合比在分析压力范围内最高雷电冲击耐受电压。 SF_6 的值是与上述混合气体分析同样的方法确定的，这在 GIS 结构的应用性已经得到多年的实际证明。不同混合气体对压力上升的反应和纯 SF_6 一样，都是非线性的。操作冲击电压情况下的趋势也是一样的。

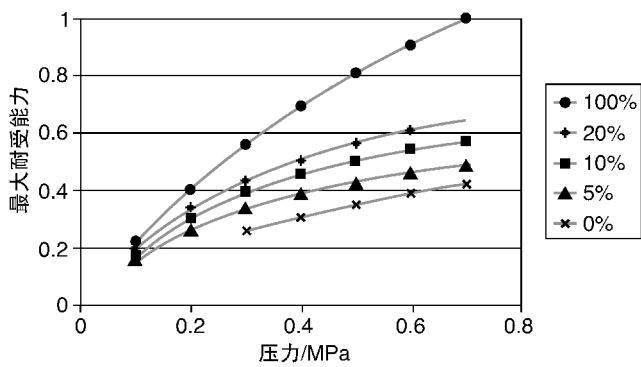


图 3.1.16 不同 N_2/SF_6 混合气体最大耐受能力与纯 SF_6 雷电冲击电压的比较（由 Siemens AG 授权提供）

图 3.1.17 和图 3.1.18 显示混合气体和纯 SF_6 在雷电和操作冲击最高耐受能力的降低，相对耐受能力是 N_2/SF_6 混合气体与纯 SF_6 雷电冲击电压耐受能力的比值，随着压力增加，相对耐受能力按混合气体与 SF_6 的比率持续降低。在雷电冲击电压下的降低比操作冲击电压略为明显。并且压力增加会导致不相称的大尺寸系统设计。在使用纯 N_2 时看不出这一趋势，由于得到的实测值数量不多，因此要考虑一定的不准确度。

混合气体的实际应用

有了实际最高耐受场强的经验和强力的电场计算程序可以设计并优化新的电极几何形状。对 GIS 和 GIL 装置来说这一基本做法已经有了多年的实践经验并且已经在 N_2/SF_6 混合气体绝缘的 420kV GIL 的设计中得到验证。在按 IEC 62271 - 204 进

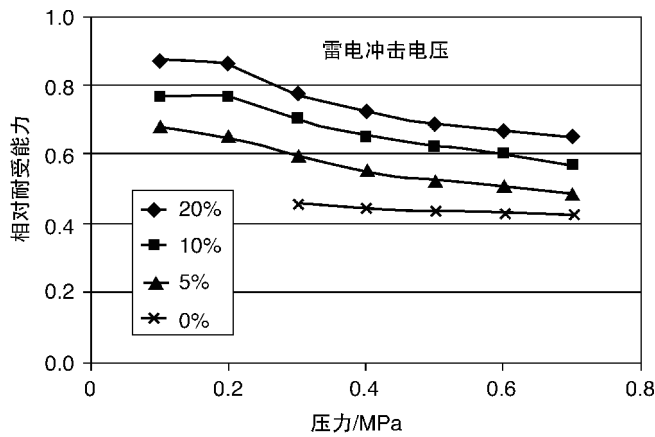


图 3.1.17 N_2/SF_6 与纯 SF_6 雷电冲击电压耐受能力的比值 (由 Siemens AG 授权提供)

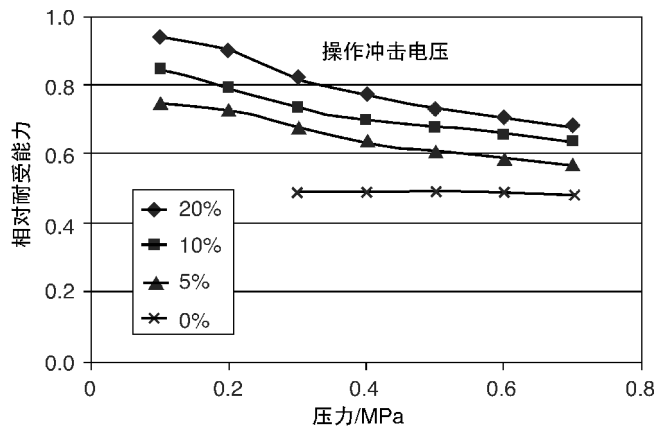


图 3.1.18 N_2/SF_6 混合气体与纯 SF_6 操作冲击电压耐受能力的比值 (由 Siemens AG 授权提供)

行的元件试验、型式试验和鉴定试验也得到证实^[54]。

高压绝缘试验是在一段包含 GIL 系统 (见图 3.1.7 ~ 图 3.1.9) 所有元件的 30m 长的 GIL 上进行的。在 70m 和 100m 长适合现场条件的 GIL 段 (见 3.8 节) 进行的长期鉴定试验包括大量试验项目并且成功完成了试验。高压试验作为系统安全的证据和其他工作试验同时在鉴定试验装置上进行, 并且验证了设计。多年来用 SF_6 的气体绝缘输电线路技术改为用混合气体绝缘进行得非常成功^[76]。

对用 N_2 加少量 SF_6 的混合气体绝缘来说已经在实际试验装置上进行了大量的试验。试验覆盖了很大范围的混合比和压力值。从试验中得到了最高绝缘能力并且研究出了 N_2/SF_6 绝缘的 GIS 和 GIL 模块的设计基础。与用纯 SF_6 的设计过程相比没有发现基本偏差的现象。在 420kV GIL 元件和 GIS 装置进行的大量的试验证明所选的设计参数是正确的。

图 3.1.19 是简化曲线，曲线的宽度覆盖了静带宽并且显示工频耐压在 N_2/SF_6 混合气体中与纯 SF_6 中的比率。

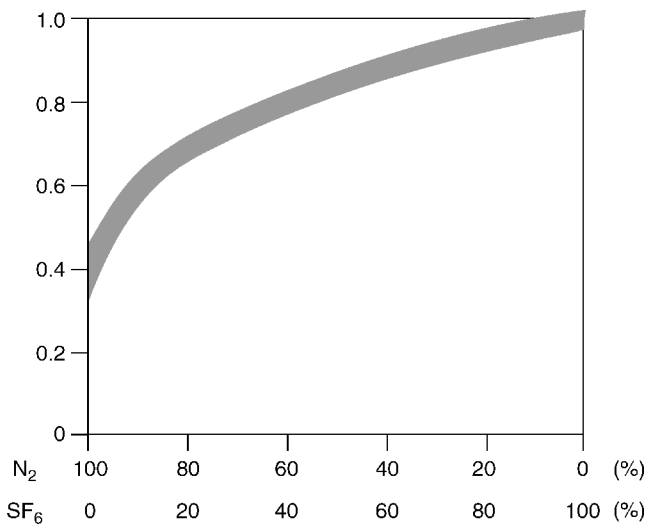


图 3.1.19 N_2/SF_6 与纯 SF_6 工频电压耐受能力的比值（由 Siemens AG 授权提供）

3.2 基本设计

什么是基本设计？GIL 的基本设计给出了配置的基本方案：最大电场强度、最高气压、绝缘气体类型和最大额定电流。这些基本设计准则的答案是额定电压和电流、额定压力、管径和壁厚。基本设计也对 GIL 每段的长度、气室大小、连接方式和敷设方式作了说明。

3.2.1 概论

GIL 技术与 GIS 的区别

GIL 的大多数气体绝缘技术来自 GIS，与 GIL 相比，GIS 具有断路器、隔离开关、接地开关、电流互感器、电压互感器和母线等多种功能元件，要复杂得多。GIL 只有输电功能，不带开关元件和互感器，和 GIL 最接近的部件是 GIS 的母线，恰恰在这里有时接地开关也会和母线结合。

GIL 从电气角度来说可以认为是带少量不均匀部位（绝缘子）的同轴结构，在绝缘子部位场强较高，大部分是准均匀的同轴圆柱电场。GIL 的尺寸是按绝缘子部位设计的，与均匀场强相比，场强值只有 GIL 均匀部分所要求场强的 60%。

GIL 与 GIS 之间有两个主要区别必须注意： N_2/SF_6 混合气体的使用和 GIL 的长度较长。 N_2/SF_6 混合气体的使用降低了 50% 的绝对绝缘能力，降低的能力通过

增加尺寸和提高气压来补偿。GIL 的长度较长对系统暂态波阻抗有影响,因为开端或闭端都会发生反射,需要安装避雷器来解决^[71]。

影响因素

在 GIL 的研发阶段需要区分很多因素来覆盖实际使用中的所有方面。直接或间接影响这一高压技术方案尺寸的主要因素解释如下:绝缘配合是和设备的额定电压相关。当额定电压确定时,试验电压可以根据网络条件确定。网络条件取决于发电的形式和规模、输电网技术(架空线、电缆、GIL)和环境要求(雷电、湿度和空气盐分)。

过电压

IEC 和 IEEE 给出了选择工频试验电压、雷电和操作试验电压的指南。当今大多数电网使用架空线,架空线需要考虑雷击和其他有关暂态过电压,这些过电压取决于输电杆塔结构以及杆塔周围的地理状况。这些对暂态过电压的幅值和发生率以及试验电压有影响。

在任何情况下都应研究用过电压避雷器来降低过暂态电压水平的机会。用避雷器作一体化保护,也就是把避雷器直接在 GIL 两端和/或其他确定的位置连接,可以限制暂态过电压水平并降低 GIL 的绝缘水平。使用避雷器可以降低 GIL 的尺寸和绝缘气体的用量,这对降低成本有很大帮助。

额定电流

除了额定电压,额定电流对 GIL 尺寸的设计有主要影响,载流能力取决于导体管的截面,也就是管子的直径和壁厚。最大载流能力由最高允许温度确定,温度限值由与导体管连接的绝缘件的绝缘材料的最高允许温度来确定。温度限值的确定是有安全裕度的,因此 GIL 由散热决定的尺寸在外部可接触的外壳管温度相当低。外壳管的大尺寸(如 550kV GIL 为 500mm)使得外壳管的表面积大,对导体产生的热量在隧道安装时向周围空气传导和直埋安装时向周围土壤传导都有好处。在隧道安装时由隧道空气对流传热,在土壤中由传导传热。

GIL 的外壳管和导体管的尺寸取决于 GIL 的散热,取决于隧道以及直埋时土壤的条件。当散热要求更高时,最后设计的管直径会比高压绝缘所要求的尺寸大。

另一个设计参数是短路电流的要求。额定短路电流越高,GIL 的机械和热要求越高,短路电流的要求来自于电网和 GIL 与电网连接点上可得到的功率。原则上说 GIL 在单相绝缘时短路特性是非常好的,在这种情况下电动力是与导体同心的,对系统没有其他机械应力。绝缘件的材料和设计必须满足这些要求。这些机械要求和绝缘要求是矛盾的,最佳情况是尽可能少用绝缘材料,这使得绝缘件机械上偏弱。两个参数通常要进行优化。

除了这两个参数的优化以外,气体压力、土壤负荷、热膨胀、弯曲以及机械应力使得这两个参数的优化变成多参数的优化。

50 年或更长的高使用寿命的期望来自于高成本的输电投资,GIL 的绝缘件、外壳管、导体管以及绝缘气体在规定的运行条件以及工作电压下没有老化效应,从

这一点来说 GIL 没有寿命限制，GIL50 年的寿命是根据 40 年的应用经验选择的。

N₂/SF₆ 混合气体

第二代 GIL 开发的主要方向是通过引入含 80% N₂ 和 20% SF₆ 的 N₂/SF₆ 混合气体来减少 GIL 中 SF₆ 的使用，通过该引入实现了两个目的：降低了绝缘气体的成本，降低了生态影响。N₂ 可以用比 SF₆ 低得多的成本得到，在长距离应用的情况下用气量很大因而成本降低效应也很大。SF₆ 气体始终保持在气室内部，任何时候都不可以向大气中排放，国际标准解释了正确的处理方法^[51,58,204,205]。

两个同心铝管

外壳管是铝合金受压气室。此外还要加上弯曲的机械应力和直埋情况下的土壤应力。外壳管还要承载感应反向电流，该电流由导体电流感应产生，绝对值低于导体电流。导体管由纯电工铝合金制成，目的是保证高导电率和低传输损耗，导体管位于外壳管中间并由支持绝缘子保持。环氧树脂绝缘子有三种：用于支撑导体的柱形绝缘子、把导体固定在外壳上的锥形绝缘子和用于形成独立气室的气密锥形绝缘子^[78]。

滑动触头系统

滑动触头系统包括一个插头和插座用来补偿两个导体固定点在 100m 之间的导体管的热膨胀，在固定点之间的导体管上，每隔 10 ~ 15m 长度有一个柱型绝缘子用来支撑导体。

轨道焊接连接

10 ~ 15m 长的 GIL 段由自动焊接工艺的轨道焊接来连接起来，焊缝用自动轨道超声试验设备 100% 检验，这种技术主要是为检验核电厂放射性段的管道连接开发的。整个焊接过程可以使每个焊缝达到非常高的质量并且由于其自动化的设计可以大量重复。

运行参数

GIL 的运行参数说明了 GIL 的电气和机械运行条件，这些参数是计算输电暂态和连续、对输电网感性和容性影响、关合及开断的影响、暂态过电压以及电网稳定的其他条件的基础。在表 3. 2. 1 中列出了两种 GIL 的技术参数的典型值，对每个工程在给定网络条件下需要计算 GIL 的影响以证明不同网络条件下的电网稳定性^[79]。

表 3. 2. 1 技术参数

	数值单位	GIL 1 ϕ 500mm	GIL 2 ϕ 600mm
电阻 R'	m Ω /km	9. 42	6. 94
电抗 X'	m Ω /km	6. 75	6. 48
电感 L'	mH/km	0. 215	0. 206
电容 C'	nF/km	54. 45	57. 08
电抗功率 $U_n = 400\text{kV} Q'_C$	Mvar/km	2. 74	2. 87
波阻抗 Z_w	Ω	63. 1	60. 3
自然功率 $U_n = 400\text{kV} S_{\text{nat}}$	MVA	2536	2869

3.2.2 由绝缘确定的尺寸

气体绝缘系统由绝缘确定的尺寸是根据最大允许电场强度确定并经试验验证,典型的允许电场强度约为 20kV/mm ,也是内部台阶和棱边的最小半径的设计依据。在影响的区域不太大的情况下 20kV/mm 的值可以更高些,这和制造商的经验以及所选材料有密切关系^[80]。

验证由绝缘确定的尺寸的试验电压是波头为 $1.2\mu\text{s}$ 、波尾为 $50\mu\text{s}$ 的高频冲击电压,高频试验电压对类似尖端的不均匀区域敏感。波头为 $250\mu\text{s}$ 的操作冲击电压对颗粒的检查比较有效。 50Hz 或 60Hz 的工频试验电压对大面积电场更敏感。

由绝缘确定的尺寸根本上是由内导体和外壳体的同轴系统形成的良好关系实现优化的,直径关系的对数为一,这意味着外壳直径比内导体直径大 2.73 倍,2.73 和数“e”有关^[81]。

3.2.3 由发热确定的尺寸

额定电流以及内部和外部温度带来的发热要求由外壳和导体管的壁厚确定。典型的绝缘件温度限值为 $105\sim 120^\circ\text{C}$,直埋的 GIL 外壳最高允许温度为 40°C 或 50°C ,隧道安装的 GIL 为 60°C 或 70°C 。每个项目都有自己特殊的热布置参数,因此对壁厚也有特殊的方案。这也带来成本的影响,因为每毫米的壁厚都会增加成本^[54,82]。

大型试验装置使正确的绝缘设计得到验证,为运行的可靠性提供了保证。

3.2.4 绝缘配合

GIL 除了由绝缘确定的尺寸外,设备与系统连接还有一个要求可能需要满足,就是使用过电压避雷器,一体化的避雷器降低了 GIL 中过电压的最大值,因此降低了绝缘水平。为实现高频暂态过电压保护需要把氧化锌 (MOX) 避雷器直接与 GIL 的气室相连接。

与架空线相比, GIL 中一体化的避雷器降低了暂态过电压。基本绝缘水平 (BIL) 取决于很多影响因素,例如,氧化锌避雷器、特性曲线、土壤电阻和架空线的地线等。

GIL 可以看作是输电线两端或多段装有暂态过电压避雷器的封闭电气系统。GIL 的外壳是金属的并且可靠接地,因此也不会受到来自外部的电气影响。对一个 BIL 为 1425kV 的架空线来说,采用 GIL 可以把 BIL 降低到 1300kV 。这说明 GIL 由绝缘确定的尺寸可以减小,对长距离输电线来说通过沿线加装避雷器可以进一步降低 BIL^[91]。

3.2.5 电气优化

电气优化是在机械参数选定以后,为优化全部电气性能而确定电气设计和绝缘

配合的过程。为此需要进行电场计算来设计绝缘子并把 GIL 的电场分布设计得尽可能均匀。

为了用实际尺寸的试验装置来验证计算, 决定用两个独立的试验装置来进行测试验证。为了使试验更真实而使用了原型零件。全部试验计划包括在气体压力至 2MPa 以及 SF_6/N_2 不同比例时进行的工频、雷电和操作冲击电压试验。在两个试验室两个试验装置同步进行的测试排除了系统失效, 为了避免测试中的系统失效, 分别在柏林和慕尼黑建立了两个一样的试验装置。

作为结论, 可以说混合气体 GIL 的绝缘强度(包括绝缘件的表面效应和颗粒效应)要求混合气体中 SF_6 含量至少为 5% ~ 10%, 从这个百分比水平开始, SF_6 表现出保证可靠功能和长使用寿命的电晕稳定特性。为了限制导体周围不均匀电场的影响气压不应该超过 1.0MPa, 后面会详细解释^[81]。

3.2.6 输电网的研究

为了协调电气设计和网络的要求, 有必要用网络计算来计算系统特性。在这些网络计算中不同的系统条件是仿真的。一般来说是用 GIL 的电气参数对以下情形进行仿真: 相间短路和对地短路, 开合空载线路以及雷电击中靠近或远离 GIL 连接点的架空线。这些是系统和网络的要求, 在第 4 章中有详细解释。

3.2.7 由气体压力确定的尺寸

GIL 充以低压力的 N_2/SF_6 混合气体, 典型的充气压力是 0.8MPa, 因此可以看作是低压容器。用作电气绝缘的气体除了气压低以外, 还是不腐蚀和非常干燥的, 这样可以排除内部的腐蚀。这是特别为高压设备采用的压力容器标准的基础, 露点为 -20°C 时的这些标准已经由 CENELEC 出版为欧洲标准并且得到国际范围的接受。

根据材料的种类和制造工艺采用以下标准:

- EN 50052 用于充气高压开关设备和控制设备的铸造铝合金壳体^[83]
- EN 50064 用于充气高压开关设备和控制设备的锻造铝和铝合金壳体^[84]
- EN 50068 用于充气高压开关设备和控制设备的锻造钢壳体^[85]
- EN 50069 用于充气高压开关设备和控制设备的铸造和锻造铝合金组合焊接的壳体^[86]
- EN 50089 用于金属封闭充气高压开关设备和控制设备的树脂浇注隔板^[87]
- EN 50087 额定电压 1kV 以上 52kV 及以下交流开关设备和控制设备的充气隔室^[88]

气体绝缘系统的运行经验表明, 压力在 0.4 ~ 0.8MPa 的绝缘气体可靠性较高, 当气压增加到 1.5 ~ 2MPa 时, 趋向内部小故障的绝缘敏感度变高, 不均匀电场的区域变多。原则上说任何气体在高气压时对暂态电压都会更敏感。

从机械方面来看压力容器不能再被视作低压了，需要投入更多努力来设计这样的外壳。出于这些原因当今多数气体绝缘系统运行在 0.8MPa 或以下的气压。

3.2.8 高压设计试验

高压设计试验给出设备的要求，这些要求来自于高压系统“绝缘配合”条款。网络中各个电压等级设计试验的值在有关标准 IEC 62271 – 204^[54] 和 IEC 62271 – 1^[82] 中给定。表 3.2.2 中列出了试验电压。

表 3.2.2 绝缘型式试验值

GIL 试验参数		
额定电压/kV	400	500
最高电压 (U_m) /kV	420	550
工频耐受电压 (U_{PF}) 1min/kV	630	750
雷电冲击电压 (U_L) /kV	1425	1600
操作冲击电压 (U_{SI}) /kV	1050	1200

对 400kV 和 500kV 系统来说，设备运行的最高电压 U_m 是 420kV 和 550kV。工频耐受电压是基于这个值，对 $U_m = 420\text{kV}$ 乘以系数 1.5，对 $U_m = 550\text{kV}$ 乘以系数 1.36。在这些系数的背后是内部放电可能性的统计学评估。因为冲击电压是静态的，在设计试验中统计的放电是允许的，多数标准要求 15 次冲击试验允许 3 次放电。

雷电冲击电压与额定电压的比率对 $U_m = 420\text{kV}$ 为 3.39，对 $U_m = 550\text{kV}$ 为 2.9，对操作冲击电压这个比率 $U_m = 420\text{kV}$ 为 2.5，对 $U_m = 550\text{kV}$ 为 2.18。这些试验电压比率是标准值，反映了过去 40 年的经验。还可以看出高电压水平的安全裕度较小，这是为了经济性的考虑而减小设备尺寸。雷电和操作冲击电压试验是为了验证设计耐受相连接的架空线遭受雷击和网络中有开合操作产生暂态电压的能力。

图 3.2.1 是 1998 年 IPH 高压试验室的试验装置，图 3.2.1 的前面是一个直的 GIL 段，图右面是用两个隔离单元连接的试验套管，在这个直段中间有一个膨胀节单元，在试验大厅的左面靠边是一个向左转 30°的转角模块。用于高压试验的空气套管与照片中央的工频试验变压器或后面的冲击电压发生器相连接，装置的总长度约为 25m。

图 3.2.2 是 1995 年在法国 Les Renardieres 的 EDF 的高压试验装置，装置的总长度约为 40m，在 GIL 的左侧末端隔离单元通过套管与高压试验设备相连接。在图片中间可以看见两个 12m 长的 GIL 直线单元，中间由一个补偿热膨胀的膨胀节单元分隔开。在试验装置的右端还有一个隔离单元把气室的左面 2/3 长度与右面 1/3 长度分隔开，最终在最右手由一个隔离单元结束了这个高压试验装置。



图 3.2.1 德国柏林 IPH 的高压试验装置
(由 Siemens AG 授权提供)

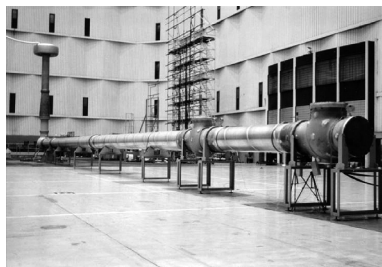


图 3.2.2 法国 Les Renardieres EDF 的高压试验装置
(由 Siemens AG 授权提供)

3.2.9 额定电流设计

GIL 的载流能力主要取决于导体的截面积和周围的散热条件。高的额定电流往往是根据特定工程的要求提出的。每个工程都需要进行热设计来选定 GIL 的直径和壁厚。

原则上说 GIL 能够承载很大的额定电流，因为其直径较大（如 500mm），这样的大直径要求最小管壁厚为 6mm。对直径 500mm 的外壳管来说有效截面积为 10000mm^2 ，而对直径 180mm 的外壳管来说是 3300mm^2 。外壳管的最大壁厚为 10mm，导体管为 16mm，截面积相应增加。

额定电流的第二个重要方面与隧道中的周边条件或直埋时的土壤条件有关，这些参数取决于工程条件，需要提前计算以找到 GIL 设计合适的直径和壁厚。对大型项目如 100km 长的系统，这意味着 GIL 要完全按项目的要求来进行设计，对小型项目如 100m 长，用标准的直径和壁厚就可以了。

图 3.2.3 是额定电流的设计试验装置，试验装置中包括 GIL 的所有单元：直线模块、转角模块、补偿器和隔离模块。



图 3.2.3 大电流试验装置
(由 Alain Sabot 授权提供)

3.2.10 额定短路电流设计

GIL 的额定短路电流由网络的要求给定，不同的额定短路电流根据网络中靠近或远离电厂的位置来确定。与电厂的距离越近，额定短路电流越大。在某些情况下几个电厂在输电网的一个节点连在一起。输电网中可以发现这些典型的额定短路电流值：50kA、63kA 和 80kA，在某些情况下可以发现 100kA。

GIL 中的额定短路电流有两个要求：

- 承受导体对地的电动力；
- 限制由大电流导致的导体最高温度。

在 GIL 这样的单相同轴系统中, 外壳是连续接地的, 电动力也环绕导体同轴, 使导体固定在外壳中央, 因此绝缘子不需要承受高的机械应力。连续接地的系统在外壳中引起反向感应电流, 两个力是互相抵消的, 合力很小。由大电流引起的系统升温小到可以忽略不计, 外壳和导体管的大截面可以补偿发热, 能测到的温升很低。这和短路电流时间短有关系, 通常是 0.5s 或更短。在这段短时间内 GIL 的铝导体和外壳管起到热存储器的作用。用图 3.2.3 额定电流的试验装置进行了要求的试验。

在短路情况下电流会非常大, 400kV 输电电网的典型额定值为 50kA 或 63kA 或 80kA。如此大的短路电流产生热量和大的电动力, 在 63kA 的地点短路时网络频率第一个波的动态电流可达到 170kA, 这个大电流在导体和外壳间以及相间产生大的电动力。绝缘件和导体管需要耐受这些力。

在外壳连续接地的单相 GIL 系统中, 电动力是环绕导体同轴的, 使导体集中在中心, 这样就把电动力从绝缘件上去掉了, 单相同轴 GIL 具有非常好的电动力耐受能力。

和三相系统不同——要求考虑导体间以及交叉连接时所有的力——只有少部分力是重叠的, 力的减少很小。

3.2.11 内部电弧设计

内部电弧设计是故障时发生内部电弧情况下耐受能力的安全值。内部电弧的原因可能是绝缘件失效引起绝缘件表面或内部电弧, 另一个原因可能是由于气室中的颗粒或导体或外壳的缺陷造成电场强度高并引发绝缘气体中放电。内部电弧在 GIL 能够发生的故障中是最严重的, 由于额定功率高, 并且在随处都能得到大功率的网络中运行, 有必要设计出安全的技术来降低运行人员和公众的风险。

通常 GIL 都安装在隧道中或直埋于地下, 因此公众是可以排除的, 运行人员需要接近系统执行操作及维护检查^[89]。

当气室中发生内部电弧时, 高温会加热气体, 气体压力上升, 压力的增加取决于电流和气室的大小, 气室越小压力越高, 这就是为什么小气室使用压力爆破片在达到规定的压力时爆破来释放气体压力。

在 GIL 中气室非常大, 可能会达到 1km, 由短路电流引起的压力上升很小, 不超过允许压力值, 因此 GIL 中不需要压力爆破片。

安全的 GIL 第二个指标是内部电弧不会在 0.8MPa 压力的外壳壁上烧出孔来。电弧的物理特性在这里有帮助, 在 80% N₂/20% SF₆ 混合气体中电弧根部像空气中一样很大, 面积大的结果是弧根温度低, 对铝外壳壁的融化水平也低, 不会烧穿。

内部电弧试验是设备很难做的试验, 通过以下比较可以更好地理解。短路电弧电流, 如 63kA, 由 8000V 的弧电压维持, 功率就是 500MVA, 大约是一个中等规模发电厂的功率, 0.5s 的能量就是 69kW·h, 这大约是 248MJ, 可以把 1000L 的水从室温 (20°C) 加热到沸点 (100°C)。

为了研发和设计试验，选择了几个试验样品包括 GIL 最终设计的所有主要部件来验证外壳在内部电弧情况下的电弧耐受能力。根据 IEC 的要求选择了一个典型装置，该方案的长度为 25m，因此由于电弧热量引起的压力升高保持在可以接受的水平。在未来 GIL 装置中气室更大，内部电弧故障引起的压力升高不会很显著，试验样品在试验室装配，为了安全还考虑了爆破片但是不会在试验中打开。图 3.2.3 所示为内部电弧试验的装置。

试验结果总结如下：

- 内部电弧试验中和试验后未见外部效应；
- 外壳未发生烧穿/外壳和导体烧蚀非常少；
- 燃弧期间外壳内压力升高非常小，爆破片不打开；
- 与在 SF_6 中的特性相比电弧特性在运动速度上更平滑，放电通道更宽大（即电弧直径大，速度低）；
- 环氧树脂绝缘件受影响不严重。

所有这些结果都说明 GIL 的运行是安全的——即使在不大会发生的内部电弧情况下对环境也没有影响。电弧故障试验的结果也表明隧道安装的 GIL 不会发生人员伤亡。

金属封闭 GIL 的运行安全性经过内部电弧在极端状况下的测试，可以保护运行状态下接近 GIL 的运行人员。图 3.2.4 是电弧试验的结果，在弧电流 63kA 持续时间 0.3s 时对外壳的影响非常小。

照片显示只有几微米的铝材料被电弧融化，外壳没有被烧穿或破裂。



图 3.2.4 内部电弧的结果
(由 Siemens AG 授权提供)

3.2.12 电动力设计

在柏林 IPH 试验室用包含对电动力最敏感的部件的试验装置进行了试验，用包括两个 90°转角模块和一个膨胀节的 Z 字形布置进行了短路受力试验。这种 Z 字形布置可以使 GIL 特别是在绝缘子上受到最大的机械应力。试验装置和额定电流试验以及内部电弧试验相同（见图 3.2.5）。

试验结果总结如下：

- 全部元件都耐受了模拟短路电流产生的电动力；
- 试验后主回路（导体和外壳）电阻未增加（事实上减少了一点）；



图 3.2.5 Z 字形布置进行电动力试验（由 Siemens AG 授权提供）

- 试验后全部元件功能正常（包括滑动触头）。

3.2.13 机械设计

GIL 的机械设计取决于敷设方式：隧道敷设或直埋。GIL 的弹性弯曲也把应力给了外壳和导体管，为了适应地形而不增加弯管类的转向元件，弯曲是需要的。

隧道安装的 GIL

相关压力容器标准对隧道安装的 GIL 适用并可给出外壳管壁厚的设计准则。此外，弹性弯曲在外壳材料上的机械力需要考虑到^[38]。

直埋 GIL

当 GIL 直接埋入土壤中时，除了要考虑隧道安装的机械力以外还要考虑热膨胀以及土壤负荷的机械力。这些附加的机械力通过使用强度更高的铝合金来补偿。用有限元（FEM）计算方法对 GIL 所有运行情况进行了仿真来对设计进行优化。见图 3.2.6 是直埋的转角模块的 FEM 计算^[90]。

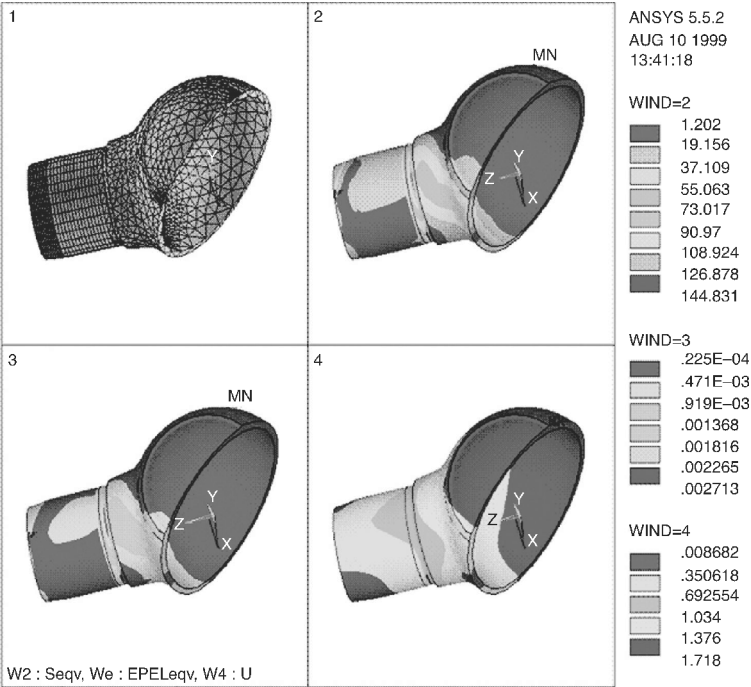


图 3.2.6 直埋敷设 GIL 的转角模块的 FEM 计算（由 Siemens AG 授权提供）

3.2.14 一体化的过电压保护

GIL 允许避雷器在 GIL 气室内直接连接，避雷器和 GIS 使用的型式一样。避雷器可以与隔离外壳相连并可以安放在输电线的任何一点。

这个一体化的避雷器用来保护 GIL 不受架空线雷击产生的过电压的影响，一体

化的避雷器是 GIL 的一部分并直接与导体连接。这意味着避雷器耦合的波阻抗低, 可以实现对高频过电压的有效保护。避雷器也可以通过空气套管与 GIL 的套管上的架空线相连。

避雷器安装于 GIL 的两端, 降低了过电压, 某些情况下需要沿输电线放置更多的避雷器来进一步降低过电压, Völcker 和 Koch 的计算表明通过安装外部或一体化的避雷器可以降低过电压。

3.2.15 颗粒

颗粒对绝缘决定的尺寸影响很大, 气体绝缘系统中颗粒可以是自由运动的, 引向绝缘件或导体, 过去数十年中开展了很多研究来认识颗粒的影响和技术解决方案^[92]。

高压气体绝缘系统的装配需要在清洁室条件下进行, 防止颗粒进入高压气室, 这个装配的质量控制过程是必须的, 在 GIS 工厂和 GIL 现场装配棚可以看到。

清洁是防止颗粒进入高压设备的一方面, 第二个重要的方面是在高压系统内给颗粒提供安全区域, 这样的安全区域定义为低电场区域, 如 GIS 的手孔。自由移动的颗粒由高压电场的电磁力提升, 这个 50Hz 的工频电磁力会使颗粒以 100Hz 的频率运动, 颗粒是飘动的。

颗粒提升时, 力会使它趋向最高电场区, 也就是导体, 当 10ms 后零电压时, 颗粒会落向外壳最低电场区域。

举例来说, 如果有一个手孔, 或是其他任何“电场阴影”形成了颗粒陷阱, 颗粒就会去那里, 一旦掉进手孔或颗粒陷阱, 就没有足够强的高压电场能把它们带回去, 这样颗粒就离开了高电场区, 不会对系统造成危害。这个过程是 GIL 调试的一部分, 称为高压老练。如果清洁工艺使用正确的话 GIL 是自清洁的系统^[93-95]。

3.2.16 发热设计

3.2.16.1 概述

GIL 的发热设计是 GIL 确定尺寸的基本准则, 导体电流和外壳感应电流产生的热量需要传导到 GIL 周边环境, 这可能是周围的空气, 在直埋 GIL 的情况下是 GIL 周围的土壤。在这一节中只能原则上介绍 GIL 在直接埋入土壤或在隧道或地上空气中敷设时热流的计算。但是会对导体内部的热量向外壳的传导作详细介绍^[78,90,96,91]。

3.2.16.2 GIL 内部热传导

概述

过去已经有很多作者研究了两个水平同温筒之间由自然对流引起的气体流动, 这些研究对太阳能集热器、热存储装置以及反应堆压力容器来说是典型的。在这种情况下对 GIL 内的气体流动也作了研究, 为研究低雷利指数 (107 以下) 以及同温筒的分层以及湍紊气体流动进行了很多实验、样机和数值计算, 只有少数研究针对非同温条件和高雷利指数 (107 以上) 的对流。在这个实验和理论研究中可以看出

气体流动方程的差别之处及其与雷利指数、普朗特指数以及半径比例之间的关系，得到了温度分布以及局部转换系数。

研究的任务

研究对两个水平同心筒（见图 3. 2. 7）之间的环形区域中的静态、二维自然对流进行了数字模拟。内环 r_i 由电流引起稳定的热流并具有恒定的温度 T_i ，外环 r_o 具有恒定稍低的温度 T_o 。流体的热物理特性设为恒定，除了瞬间平衡的上游区的流体密度。雷利指数在 $10^6 \sim 10^{10}$ 之间，半径比例为 $2.5 \sim 2.6$ 。重力垂直指向底部，图 3. 2. 7 为物理模型示意图。

限制条件

为了解决这 5 个等式需要气流的限制条件和分界，在不同的研究中内筒以恒定的流量被加热，保持恒定的温度，外筒处于恒定温度 T_o ，几何形状是垂直对称水平，解答是按垂直半水平做的，沿分界的轴向和垂直速度为零。对称线上的轴向速度和轴向热传递为零，此外，在两个筒表面稳定热传递时，用的是辐射。

结果和讨论

半径比例 $R + = 2.5$ 和普朗特指数 $Pr = 0.77$ 几乎是恒定的^[52]。

图 3. 2. 8 示出了内筒和外筒之间的间隙内热传递和气体流动线。气体流动线由

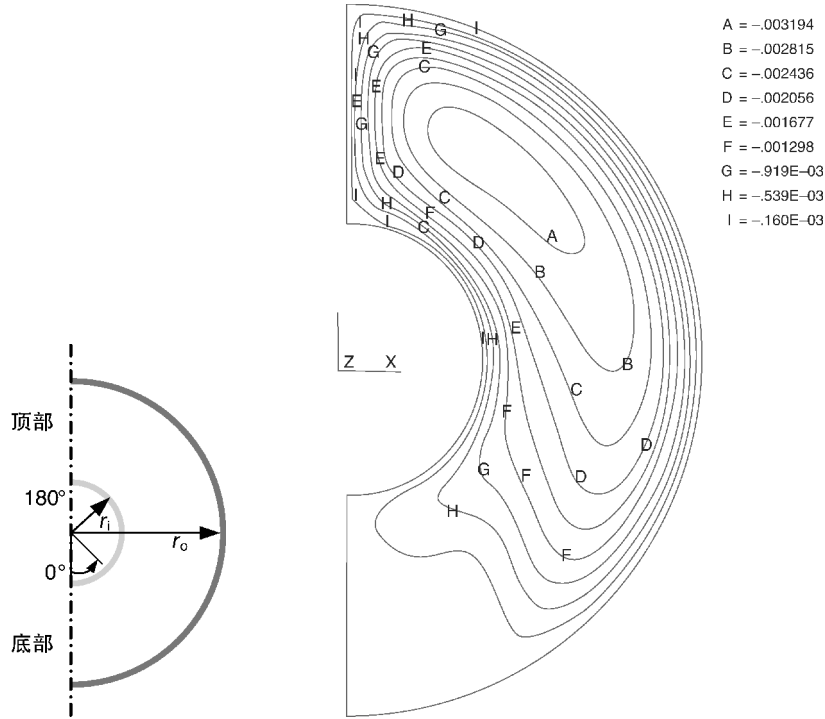


图 3. 2. 7 环形区域（由 Siemens AG 授权提供）

图 3. 2. 8 气流线（由 Siemens AG 授权提供）

内导体起始，导体加热气体。在顶部加热的气体垂直流向外壳并沿外壳流向筒间隙的底部，在向下流的过程中热量传给外壳，冷却的气体沉到筒间隙的底部，气流从那里被导体表面加热并开始下一个循环。

这一对流冷却系统是导体管到外壳管以及到周边环境及土壤良好热传递的物理背景原因。

发热试验装置

图 3.2.9 示出了 GIL 的发热试验装置，GIL 的内筒和外筒由铝合金制造，内筒的外径为 250mm，壁厚为 16mm；外筒的内径为 630mm，壁厚为 10mm。两筒之间有 SF₆ 和 N₂ 的混合气体作为绝缘气体。两个筒都由电流加热，且每 12m 由环氧树脂浇铸的绝缘件来支持。外筒由玻璃棉来绝热，内筒（导体）和外筒（外壳）的温度由热元件在 0°（测量点 1、2）、90°（测量点 3、4）和 180°（测量点 5、6）角度进行测量。试验装置的远端对测量没有影响，试验数据在试验开始 12h 后收集。

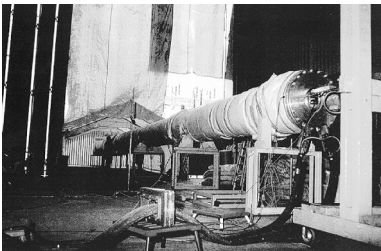


图 3.2.9 发热测量试验装置
（由 Alain Sabot 授权提供）

表 3.2.3 是不同计算模型的实测和计算数据。

表 3.2.3 计算结果和实测结果的比较

角度（°）	$Ra = 2.1 \times 10^9$ 实测温度 T /K ^①	内筒等重 模型 T/K	斯巴尔丁模型 T/K	凡德雷斯特模型 T/K
0	325.56	331.39	333.90	333.27
90	325.06	325.06	327.79	327.30
180	325.46	330.67	335.11	335.24

① 数值计算时使用绝对温度（K），实际温度用摄氏度（℃）表示。

在 0°和 180°处的计算值和实测值的差距很小，这两处分别是内导体和外壳之间间隙的顶部和底部，90°处，这里是对流的中间，该处的计算值和实测值基本一致。

结论

计算和实测显示，基于水平同轴环内的湍紊自然对流，内导体筒和外壳筒之间的热传导是非常有效的，可以把导体的热量传出去。这是 GIL 高输电能力及其良好过载特性的物理基础。

对流传热在 GIL 任何负载和温度水平都很有效^[96]。

3.2.16.3 直埋 GIL

直埋 GIL 是直接向土壤传导，热传递的主要方式是土壤和 GIL 外壳之间的热传导，气体绝缘 GIL 内部导体和外壳管之间的间隙主要是热对流，在 3.2.16.2 节有

介绍^[52]。

土壤中的热传递在 IEC 60287^[53]中有说明和计算方法，计算方法基于热量仅通过传导方式的物理特性。

有限元分析

为了验证分析模型进行了有限元计算，由于热传输主要发生在径向，所以选择了二维模型，计算范围选择了40m长20m深的模型用来考虑 GIL 发热影响的所有方面，物理参数与分析模型相同，网格选用三节点单元，靠近 GIL 处的网格密度是远离 GIL 或电缆区域的10倍。

静态结果和讨论

为计算目的使用了含6个单相的双系统，相间距离为1.3m，GIL 的埋入深度为1.2m。图 3.2.10 是以6个单相的中心线为对称线的计算结果^[52,78]。

计算条件是电流负荷为恒定1700A，空气温度恒定为40℃，土壤温度恒定为35℃，土壤的热阻也设为恒定，为1.2mK/W。用热传递中的焦耳效应以及热传递的几种模式（对流、辐射、传导）对导体和外壳的温度及损耗进行了计算。

中间相是最热的，因为相邻相对它有热输入，最热点是在 GIL 的底部和边上，边上也是由于其他相的影响，底部是由于从底部到土壤表面的热阻高于从顶部到土壤表面的热阻，图 3.2.10 显示直埋 GIL 的最高计算温度为69℃。

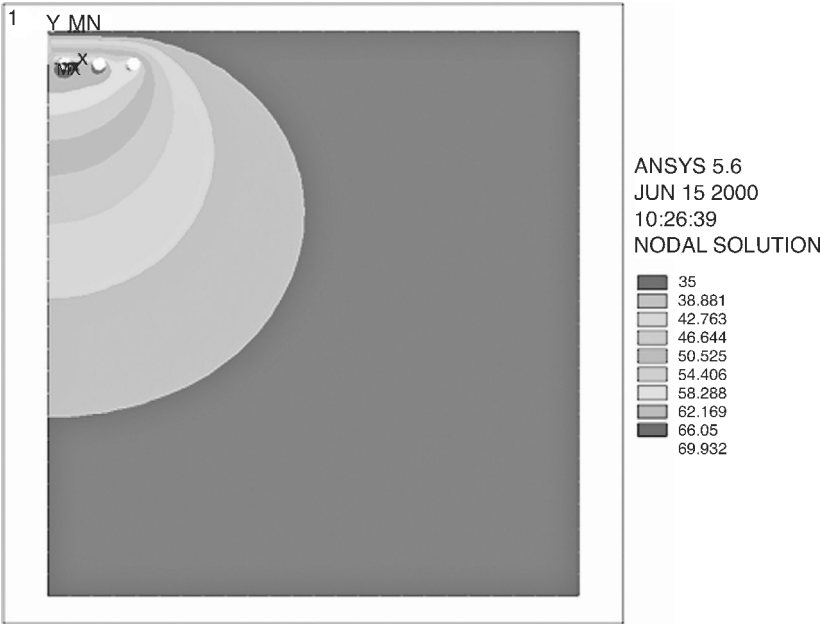


图 3.2.10 持续额定电流下直埋敷设 GIL 的温度分布：1700A，双系统，损耗 33.7W/m。温度码：35℃图右侧，66.05℃图内侧，所有灰色区为中间值（由 Siemens AG 授权提供）

GIL 的过载计算

计算表明,即使在严酷环境和温度条件下,GIL 仍然表现出过载能力裕量,这意味着说,即使在 1700A 恒定电流负荷,在一定时间段内还是可以接受额外的过载,下面对过载计算进行了介绍。

对双系统 GIL 进行了两种过载,相间轴距 1.3m,埋入深度 1.2m,从稳态条件以 1700A 额定电流为 100% 开始,分别对 120%、150% 和 200% 的过载进行了计算。图 3.2.11 显示出 GIL 在 120%、150% 和 200% 过载情况下的最高外壳温度。

图 3.2.11 显示在 2400h 时负荷增加了 20%、50% 和 100%,对应的电流分别为 2040、2550 和 3400A。计算表明 2400h (100 天) 以后系统尚未到达最终温度 69℃,此时的温度约为 60℃。GIL 在外壳上的最高温度为 95℃ (相应导体的温度为 105℃)。这一温度在过载 20% 和 50% 133 天以后也没有达到。通过电流计算可知 GIL 可以传输 2500A 的电流,这个电流是 50% 过载并达到最高温度。当过载 100% 即 3400A 时,200h 或 8.3 天以后可以达到最高温度^[78]。

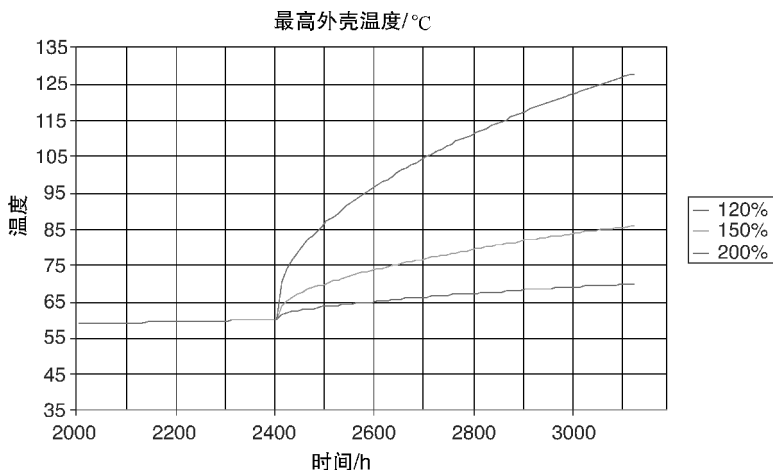


图 3.2.11 GIL 在 120%、150% 及 200% 过载时的最高外壳温度 (由 Siemens AG 授权提供)

结论

为描述直埋地下的 GIL 的稳态发热特性使用了计算模型,模型中包括 GIL 和周围土壤,计算考虑了土壤中三种热传输方式:传导、对流和辐射,使用的模型既全面又简化,避免假设,特别是由于目前热传递只发生在径向且混合气体为理想气体。GIL 表面的热传递主要由环状以及土壤表面到周围空气的对流现象所控制。该模型经有限元计算验证,分析结果和数值结果之间是符合的。

按以上参数 (65℃) 直埋的 GIL 导体处的温度低于 GIL 内部元件的限定值 (该限定值按 IEC 62271-1 标准规定绝缘件处为 105℃)^[82]。

直埋系统中影响发热的主要因素有以下几个:

- 该研究中热阻考虑为规范书的值 1.2mK/W ，热阻可以认为是恒定的，但实际上由于直埋系统周围的干燥现象，这个值会随时间增加，即便使用了热阻稳定的回填土也会这样。如果在计算中用 1.2mK/W 的值，导体温度会升高约 30%。

- 土壤表面温度假设为恒定的。如果这个条件换成非等温条件（土壤表面和周围空气界面的对流），直埋系统的温度约上升 10%。

发热计算表明：使用 GIL 可以在严酷天气和发热条件下实现大容量输电，并且可以在使用期限内提供足够的安全裕度^[90]。

3.2.16.4 隧道敷设的 GIL

敷设于隧道的 GIL 的发热设计取决于传输损耗、环境温度和隧道长度。3.2.16.2 节对 GIL 内部导体管的热传递作了详细的介绍，GIL 周围的空气通过对流向隧道和隧道壁传递热量。从隧道壁向周围土壤的传热在 3.2.16.3 节作了介绍，隧道壁以传导方式传热。

如果隧道壁的传热不够充分，则需要在隧道内通过排风井向外部排风来传递热量。

某些情况下自然排风就足够了，如果进风井的标高低于出风井，自然排风会自动进行（烟囱效应）。

如果自然排风不足以排出热量就需要增加排风扇，隧道中的强制排风受风速的影响， $5 \sim 10\text{m/s}$ 的低速是最有效的，由于热量传递到流动空气流的传递时间以及须覆盖全部隧道截面。隧道内空气速度越高，流动空气的截面就越小，边界被冷却的效果越差。这说明强制排风有应用局限性。

如果强制排风还不够有效，最后的选择是冷却进入的空气，这个方法是成本最高的，需要大型冷却装置，投资大、维护成本也高。

隧道敷设的 GIL 的发热设计是复杂的工程研究，在每个使用隧道的输电项目规划时都必须考虑。

3.2.17 抗震设计

3.2.17.1 概述

除了机械和发热布置以外^[93]，还需要研究系统在地震时的表现，GIL 是长度很长的输电系统，无法用振动台和试验装置来模拟地震现象。模拟地震要求的计算方法有很多，可以使用一些验证过的方法。直埋式 GIL 可以承受典型地震产生的力和加速度。用铝合金 AlMgSi0.5 制成的铝导体和 AlMg4.5Mn 制成的铝外壳的最大材料应力在材料常数和安全系数上必须是可以接受的。而且，有必要证明 GIL 系统在给定的加速度和频率模式下导体对外壳的最大位移。地震计算的加速度在水平方向和垂直方向都取 $0.5g$ 。

3.2.17.2 GIL 的建模

第一步，对 GIL 系统导体、外壳、锥形和支柱绝缘子等基本元件进行了模型分

析。第二步，对典型地震的响应频谱作了计算。最后，考虑 GIL 的位移和频率模型组合。这里用的频谱是地面加速度和频率之间的相关函数，该规则的假设是 GIL 的整个结构都用同一频谱来模拟，即单点响应频谱（SPR）。

3.2.17.3 参数

影响 GIL 地震特性的参数是外壳和导体管的直径，绝缘件的形式、距离和材料特性。

被研究的 GIL 段 120m 长度和直径 600mm 是长而且薄、柔性的装置。柔性使得 GIL 在地震过程中能够跟随土壤的运动，不大可能损坏。GIL 的柔性在另一方面可能产生谐振，这会损坏绝缘件，需要避免。

420kV 直埋式 GIL 选择的参数见表 3.2.4。

表 3.2.4 地震研究的参数

导体	直径	220mm
	材料	AlMgSi _{0.5}
外壳	直径	600mm
	材料	AlMg _{4.5} Mn
绝缘子	支持绝缘子距离	12m
	锥形绝缘子距离	120m
材料参数	铝	
	弹性模量	$E = 7.1 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$
	泊松系数	$\nu = 0.33$
	密度	$\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$
	绝缘子	
	弹性模量	$E = 1300 \text{ N/mm}^2$
	泊松系数	$\nu = 0.25$
	密度	$\rho = 2300 \text{ kg/m}^3$

3.2.17.4 许用强度

材料在 0.2% 剩余塑性应变的最大许用强度，包括 $k = 1.5$ 的安全系数，在表 3.2.5 给出，这意味着：

$$\sigma_a = \frac{Rp^{0.2}}{k} \text{许用强度}$$

(3.2.1)

导体不受压，因此不必考虑安全系数。

3.2.17.5 计算模型

为了搭建尽可能与实际应用相近的模型，把 10 段直线 GIL 单元焊接在一起组成 120m 长的 GIL 段，每 12m 放置支持绝缘子。计算在三个维度（ x, y, z ）进行，计算应用了模态和频谱分析。利用系统对称的优点，只须对模型的 1/4 进行计算。模型尺寸由 Pro/ENGINEER 设计软件来建立并以 IGES 文件格式导入有限元程序来

表 3.2.5 材料最大许用强度

	导体 A 型	导体 B 型	外壳
许用材料应力/(N/mm ²)	AlMgSi _{0.5}	AlMgSi _{0.5}	AlMg _{4.5} Mn
基本材料	160	195	83.3
焊接区域	65	95	83.3

模拟地震时的物理现象。计算用的网格用外壳单元来生成。计算的边界条件为导体在 x 方向固定在一端，另外一端自由运动，在 120m 长的 GIL 段的端部的盆式绝缘子是导体和外壳的固定点。

计算模型如图 3.2.12 所示（模型的 1/4）。导体在 GIL 段的端部与外壳固定，然后相连的是四个半 12m 长的段——支柱绝缘子装在外壳里面，垂直方向仅作了一半的模型。

模型对 12m 长的导体和外壳通过焊接组成的 120m 长的 GIL 段做了详细的仿真，支柱绝缘子装在 x 和 y 方向，正 z 方向自由运动（见图 3.2.13）。



图 3.2.12 120m GIL 模型的 1/4
（由 Siemens AG 授权提供）

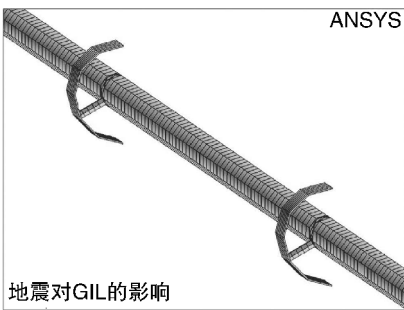


图 3.2.13 12m GIL 段支柱绝缘子、外
和导体管的模型（由 Siemens AG 授权提供）

3.2.17.6 分析结果

首先用模型分析来确定固有频率。导体长度为 120m，每 12m 装支柱绝缘子，这使得结构发生自由振动，然后固有值在低间隔区间，特别是在频谱响应的动态谐振区域。这里研究的负载组合用表 3.2.6 报告。

表 3.2.6 频谱分析的负荷系数

负荷情况	重量	SPR 分析		
		x	y	z
1	1	1	0	0
2	1	0	1	0
3	1	1	1	0

为了模拟最恶劣情况假设地震的水平加速度和垂直加速度是相同的。通常情况垂直加速度约为水平加速度的 50% ~ 75%。对外壳内支撑导体的两种绝缘子布置方式进行了研究，第一种是两个绝缘子成角布置在导体下部，第二种是上部有第三个绝缘子。第一种布置方式（两个绝缘子）的最大位移见表 3. 2. 7。

表 3. 2. 7 两个绝缘子时 x , y 和 z 方向的最大位移

方向	ux	uy	zu
位移/mm	0. 23	7. 6	2. 3

第二种布置方式（三个绝缘子）的最大位移见表 3. 2. 8。

表 3. 2. 8 三个绝缘子时的最大位移

方向	ux	uy	zu
位移/mm	0. 4	19. 7	1. 9

仿真显示导体以最高振幅向上振动，在两种情况下——垂直和水平激励时——最大值发生在垂直方向，因为 GIL 在这个方向是自由运动的。只有两个支持绝缘子的 GIL 最大振幅为 8mm，水平激励时的冯米赛斯应力达到 57N/mm²（垂直激励时该值为 81N/mm²），该最大值出现在导体和绝缘子固定区域的接触表面。导体上部和外壳间第三个绝缘子的影响也做了模拟，结果显示在中部出现位移最大值，在接触表面出现强度最大值。

两个激励（水平和垂直）的合成对 GIL 导体的振幅（ $uy = 6\text{mm}$ ）更好，但这对应的是冯米赛斯应力的高数值（87N/mm²），仍低于应力限值。模型分析和频谱响应的理论未考虑绝缘件和外壳间接触元件，因为频谱分析仅具有线性特性。为了解决这个问题，假设接触面的接触点在给定方向具有同样的位移。两个绝缘子的实际位移在计算值和三个绝缘子的值之间。两种情况导体的最大位移在 8 ~ 19mm 之间。这个位移值是 GIL 电气和机械设计的基础，这样就不会出现电气或机械故障^[99]。

图 3. 2. 14 显示水平和垂直位移的图形仿真结果。

3. 2. 17. 7 结论

GIL 地震要求的分析结果显示绝缘子和管子上的机械力小于允许限值。地震的振动频率比 GIL 的自振频率高得多，这意味着每 12m 设置支柱绝缘子，每 120m 固定点设置盆式绝缘子的 GIL 设计在地震时不会损坏，机械位移和材料应力在给定限值以下。结果是电气限值也得到满足，在 0. 5g 水平和垂直加速度的地震情况下 GIL 不会发生闪络。

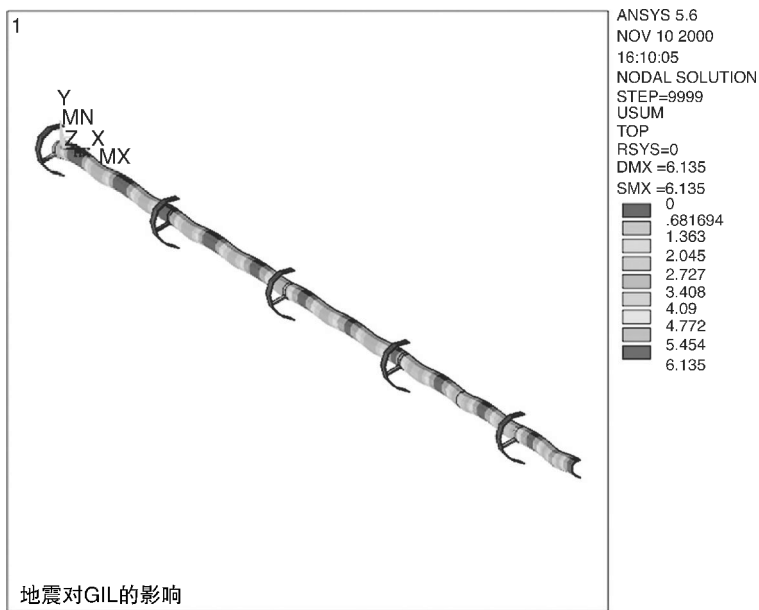


图 3.2.14 水平和垂直方向的位移。位移代码：深灰色表示位移量大（由 Siemens AG 授权提供）

3.3 产品设计

外壳和导体的尺寸和额定电压、气体压力、 N_2/SF_6 混合气体中 SF_6 的含量以及额定电流有关。GIL 经常用于 420kV 或 550kV 这样的高电压等级以三相电气系统来输送达到 3000MVA 的电能。在隧道中通常安装两个三相系统，如图 3.3.1 所示。



图 3.3.1 隧道内的三相 GIL 的结构原理（由 Alpiq Suisse SA 授权提供）

3.3.1 技术参数

表 3.3.1 列出了 420kV 和 550kV GIL 的主要技术参数。

表 3.3.1 主要技术参数

名称	单位	形式 1	形式 2
		400kV GIL	500kV GIL
额定电压	kV	400	500
系统电压	kV	420	550
额定电流	A	3150	4000
额定功率	MVA	2200	3400
雷电冲击电压	kV	1425	1550
短路电流	kA/3s	63	63

(续)

名称	单位	形式 1	形式 2
		400kV GIL	500kV GIL
外壳管直径	mm	500	500
导体管直径	mm	180	180
气体压力	MPa	0.7	0.7
每米重量	kg	25	30
导体管壁厚	mm	8	10
外壳管壁厚	mm	8	10
混合气体	%	20% SF ₆ 80% N ₂	60% SF ₆ 40% N ₂

在 420kV 和 550kV 电压等级，GIL 是用铝合金外壳管和导体管组成的单相同轴管系统。三相 GIL 就有三个管子，带高电压的导体管由支柱绝缘子支撑在接地的外壳管内。绝缘子是环氧树脂制造的支柱绝缘子和盆式绝缘子，绝缘气体在 420kV 时是 80% 的 N₂ 和 20% 的 SF₆，在 550kV 时是 60% 的 N₂ 和 40% 的 SF₆。气体压力为 0.8MPa^[204,205]。

外壳管可以用铝板弯制纵向焊接、也可以用螺旋焊管或挤制管。螺旋焊管是用自动焊机焊接成的无限长的管子，再按运输要求切割成 12 ~ 18m 长的段。挤制管是用铝块在挤出机上按要求的长度和壁厚挤出的管子。

在外壳管内部有按长度布置的颗粒陷阱，用来形成捕捉自由运动颗粒的低电场区域，外壳管是气密的，可以排除外部对 GIL 高压部分的影响。

图 3.3.2 所示是 GIL 的结构原理。从左至右分别为：转角模块、直线模块、隔离开关模块、补偿器模块和直线模块，这 4 种 GIL 模块可以组成输电的任何应用，可以满足输电线项目的要求，包括弯曲半径可以下达 400m 的弹性弯曲^[206]。

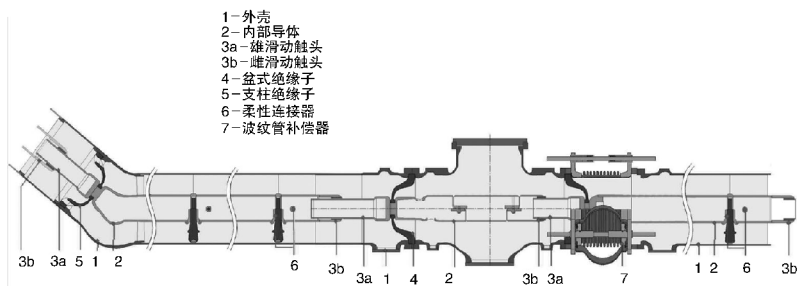


图 3.3.2 GIL 的结构原理 (由 Siemens AG 授权提供)

以下元件的主要功能为：

直线模块：覆盖输电线的大部分距离，允许弯曲；

转角模块：以任意角度转变方向；

隔离开关模块：对气室进行分隔；

补偿器模块：在隧道敷设或地面敷设时补偿外壳热膨胀。

以下章节对 GIL 各种模块的功能作了详细介绍。

3.3.2 导体管

导体管是用高导电性的电气铝制成的挤出管，如图 3.3.3 所示，选用电气铝是为了通过高导电率来降低输电损耗。电气铝的铝含量高，通常大于 99.5%，因此电阻低、输电损耗低。从机械方面来说电气铝材料表面很软，机械强度低，因此电气铝不能用于外壳管。挤出导体管的长度取决于壁厚，并且应该尽量长以减少现场接头。第二个参数是与现场装配对应的运输长度，大多数情况下选择 12 ~ 18m。

导体焊接处的表面质量非常好，因此不再需要机械加工来对表面进行平整处理来满足高电压的要求。高电压要求导体管的表面粗糙度为 10 ~ 20 μm ，不能有划痕或尖端，对制造工艺有特殊要求。



图 3.3.3 外壳管内的导体管
(由 Siemens AG 授权提供)

3.3.3 外壳管

直径较大的外壳管有几种不同的制造工艺：挤出管、螺旋焊管和纵缝焊管。

挤出管是用压出工具用铝块压出来的，直径大到 650mm 的外壳管需要大尺寸的挤出机，并且对外壳管的最大长度有限制，铝合金需要有好的挤出特性，这样就降低了导电率。管是无缝的。

螺旋焊管是用双头弧焊机把卷材焊接制成；每一个卷材包括几百米铝板材，螺旋焊机可以生产无限长的外壳管直到更换新的铝卷材。在螺旋焊机末端外壳管被切割成项目所需的典型段，通常为 12 ~ 18m。管子用双头自动焊机制成，包括对螺旋焊缝进行 100% 质量控制的双头超声检测系统。图 3.3.4

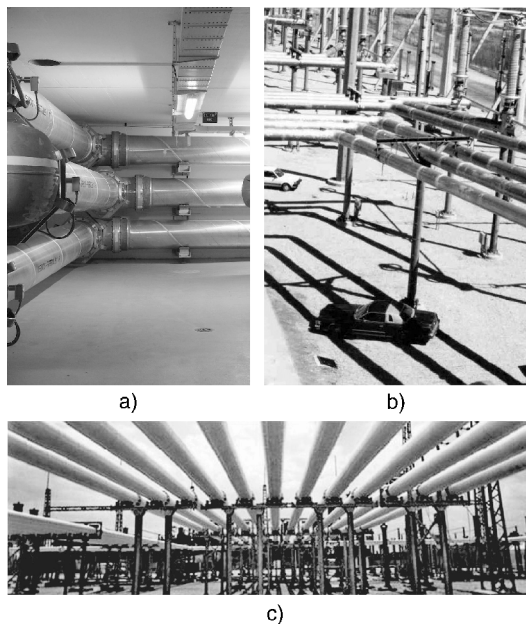


图 3.3.4 外壳管：a) 螺旋焊接；b) 纵向焊接；
c) 无缝挤制（由 CGIT Systems a),
Siemens AG b), Alstom Grid c) 授权提供)

是螺旋焊管的外形图。

纵缝焊管用铝板制成,通常铝板为3m长,拼接成12~18m长的GIL段。板材用轧机轧成圆柱形,然后用纵焊缝完成管子。纵缝焊管现在已经很少使用,因为焊接的要求太多。使用最多的外壳管是螺旋焊管,因其圆度和直径的精度都高,这对电气系统是很重要的。GIL管要求的精度是没有高电压要求的标准管子的公差的一半。500mm外壳管的圆度和直径的公差都是 $\pm 10\text{mm}$ 。根据挤出机的技术特性,挤出机需要挤出若干管子以后才能达到要求的公差,这也是管子数量较多的原因。

3.3.4 气室的大小

气室的大小取决于气体处理设备的工作效率以及高电压试验时的最大允许容性负荷。对气体处理来说需要用真空泵来达到2kPa(20mbar)以下的真空度,当用25mm和50mm的气阀连接真空泵时抽到这个真空度是很耗时的。1000m长的气室是实际使用的,抽真空需要8~10h。

同样100m的长度也满足GIL允许容性负荷的要求,容性负荷给出了GIL储存的能量,如在高压试验中发生放电,这些能量不会损坏绝缘件表面。

GIL输电线的规划也要考虑使气室长度适应当地条件,可以用隔离模块来分隔气室。因为这个原因1000m的气室长度可以稍长或稍短,但不要超过1.5km长。

3.3.5 绝缘件

不同类型的绝缘件从开始就被开发出来满足支持导体和分隔气室的要求,原则上支柱绝缘子和盆式绝缘子,支柱绝缘子可以有一个、两个或三个柱(见图3.3.5)。

支柱绝缘子

支柱绝缘子根据其特殊要求可以有一个、两个或三个柱:

- 单柱型把导体固定在中间并用绝缘材料包覆导体,外壳侧与接地固定点相连。

- 双柱型绝缘子插在导体管的插座上,外壳侧有滑动机构,绝缘子由自身重量支持导体。

- 三柱型绝缘子用于垂直安装的GIL,此时重力不能保证导体处于外壳中心。

GIL目前所用的材料为高机械强度耐电蚀的环氧树脂混合物,耐电蚀特性对防止高压试验时表面放电很重要。

盆式绝缘子

盆式绝缘子有两种,一种是气密型用于外壳管端部,或者由两个气密盆式绝缘子形成封闭气室。另一种盆式绝缘子是非气密的,用于把导体固定在外壳上,称为



图 3.3.5 支柱绝缘子

(由 Alpiq Suisse SA 授权提供)

导体固定点。

盆式绝缘子的锥有不同的斜度，典型的锥为 $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$ ，但是也有 45° 的锥形，另外一个极端就是没有任何锥度的平面。原理是支撑导体的机械强度要满足额定短路电流，并且要形成达到 1.0MPa 过压力的气室。根据要求值可以有不同锥形的解决方案。

图 3.3.6 所示为盆式绝缘子和滑动触头，铝外壳管（1）通过两个固定环把盆式绝缘子（4）夹持在外壳内，导体管（2）、带公触头（2a）和母触头（2b）的滑动触头系统由盆式绝缘子固定在中心，盆式绝缘子有两个孔来连通盆式绝缘子（4）左面和右面的气体空间。

在左面和右面的气体空间需要分隔的地方就需要不带孔的盆式绝缘子来分隔气室。盆式绝缘子需要承受导体工作时额定电流和短路电流情况下的机械力，对气密盆式绝缘子来说最大压力（一边最大充气压力另一边真空）是附加的机械设计指标。

第一代盆式绝缘子用裙边来增加表面爬电距离，随着环氧树脂绝缘件铸造技术的发展以及绝缘子生产过程质量控制水平的提高，目前已经不需要这些表面裙边了。

3.3.6 滑动触头

导体电流会加热导体造成导体管膨胀，滑动触头用于补偿这种热膨胀。这种滑动触头带有插座，多触头系统可以在其上滑动。多触头滑动系统的优点是电流沿导体管分布，并且多触头系统的灵活性允许连接有公差。这种多触头系统在很多应用场合已经证明了它的高可靠性，寿命可达 50 年以上。

3.3.7 模块设计

GIL 的模块设计有 4 种标准单元：直线模块、转角模块、补偿器模块和隔离模块^[38,100-102]。

3.3.7.1 直线模块

直线模块是单相绝缘的 GIL 段，如图 3.3.7 所示。

内部导体（2）被盆式绝缘子（4）固定在外壳（1）内，并由支柱绝缘子

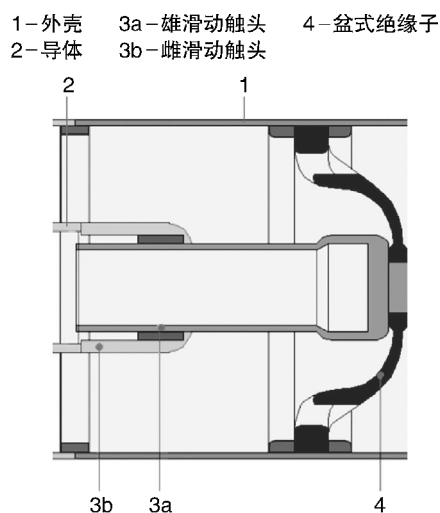


图 3.3.6 带滑动触头的盆式绝缘子（由 Siemens AG 授权提供）

(5) 支撑，导体对外壳的热膨胀由滑动触头系统（3a，3b）来调节。一个直线模块可以有 120m 长，由若干 12~18m 长的 GIL 管段用轨道焊机焊接而成。如果需要比直线模块的弹性弯曲更大的转向就需要加转角模块，转角模块包括 $4^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 的角。

直线模块只有外壳管内定位的绝缘子，用轨道焊机连接，直线模块可以在隧道内不需任何外部防腐保护来敷设。当在土壤中直埋时需要使用聚乙烯或聚丙烯制成的被动防腐涂料。整个直线模块可以在弯曲半径大于 400m 时弯曲敷设。直线模块在隧道内附设时由钢结构来支撑，此时直线模块在固定点上滑动，允许外壳热膨胀。当直线模块在土壤中直埋时周围泥土不能含石头，固定在土壤中，不能有纵向运动。

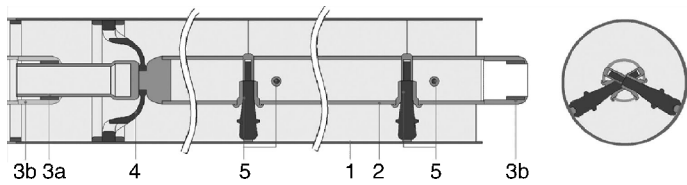


图 3.3.7 GIL 的单相直线模块（由 Siemens AG 授权提供）

3.3.7.2 转角模块

目前用铸铝外壳来转变方向，每个角可以设计成 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 之间。管子的成角切割在技术上是可行的，该方法是把管子按角度切割，转向之后再焊接起来。另一种可能性是在要求角度方向带焊接法兰的铸铝外壳。转角模块用于转急弯以及 400m 弯曲半径不够的场合。转角模块比弹性弯曲要贵得多，要尽可能避免使用。

转角模块包括一个用单相铸铝合金外壳，内部导体（2）由盆式绝缘子（4）固定并由支柱绝缘子支撑在外壳（1）内。导体对外壳的热膨胀由滑动触头系统（3a，3b）来调节。转角模块与直线模块的连接由轨道焊接来实现，如图 3.3.8 所示。转角模块包括 $4^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 的角。在大多数地形情况下转角模块是不需要的，因为弯曲半径为 400m 的弹性弯曲足够跟上地形。

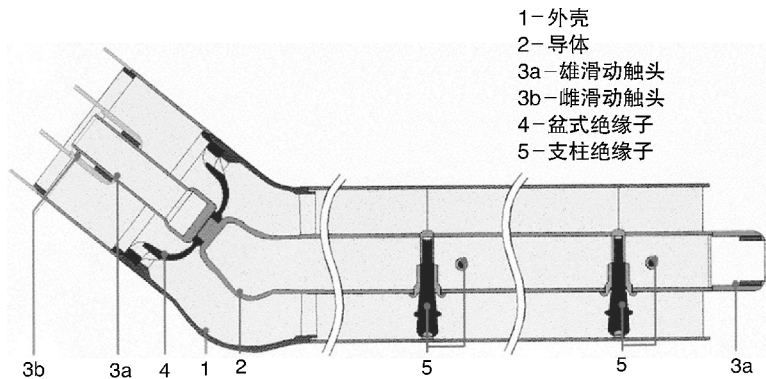


图 3.3.8 直线模块与转角模块相连（由 Siemens AG 授权提供）

3.3.7.3 隔离模块

每隔 1000 ~ 1500m 需要在地下井中放置隔离模块。隔离模块用于分隔气室并且在 GIL 调试时连接高压试验设备（见图 3.3.9）。

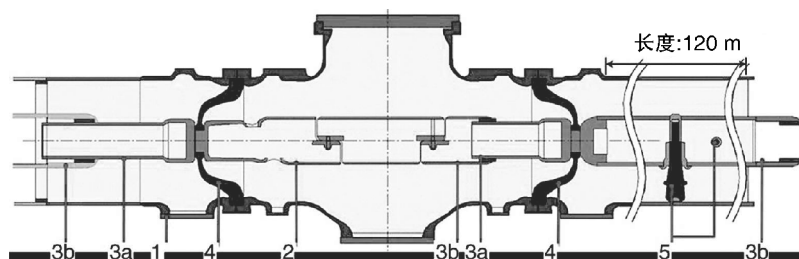


图 3.3.9 隔离模块（由 Siemens AG 授权提供）

在图 3.3.10 中可以看到隔离模块包括气室的短接，这种短接是出于运行的要求而把隔离模块之前和之后的气室连接起来，在气室需要分隔时短接可以去掉。

3.3.7.4 补偿器模块

为了补偿外壳管的热膨胀使用补偿器模块来补偿长度方向的热运动，补偿器由波纹管制成，可以吸收 300 ~ 400m 的外壳管的热膨胀。补偿器模块安装在隧道内（见图 3.3.11）。当 GIL 直接埋入地下时不需要补偿器，因为土壤的重量把外壳管固定住了，也就没有运动了。



图 3.3.10 隔离模块的短接（由 Siemens AG 授权提供）

吸收运动的波纹管不能承载电流，这就是用柔性铜排作为电气短接的原因。

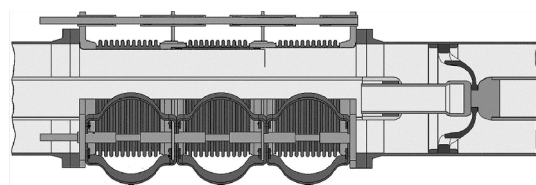


图 3.3.11 补偿器模块（由 Siemens AG 授权提供）

3.3.8 与架空线的连接

当 GIL 与架空线连接时需要用到气体对空气的套管。这些套管是标准的高压套管。与套管一起连接有避雷器来保护 GIL 不受架空线雷击产生的瞬态过电压的影响，套管和避雷器可以布置在架空线下方，如图 3.3.12 所示。

3.3.9 弯曲半径

GIL 是长距离、大容量地下输电技术，这意味着它必须跟上地形的变化。金属外壳管和导体管要求和输油或输气管道类似的敷设技术，要用到材料的弹性弯曲。弹性弯曲意味着没有塑性变形，后者是高电压要求的正确管道圆度所不允许的。有限的弯曲在输油或输气管道是允许的，但在 GIL 就不允许，因为导体和外壳间的距离要用作电气绝缘。由于这个限制，500mm 或 600mm 外壳直径最小许用弹性弯曲半径为 400m。

除弹性弯曲以外，设计中还需考虑以下机械应力：

- 气体压力；
- 直埋时的土壤载荷；
- 热膨胀力；
- 交通载荷。

在路线必须每米解决时弯曲半径是基本的项目规划参数，当转向不能由半径为 400m 以上的弹性弯曲解决时全部项目成本和采用 GIL 转角模块的数量有关。

图 3.3.13 所示为 GIL 在隧道内安装的弹性弯曲，这个例子的弯曲半径为 700m。

3.3.10 导体和外壳的连接技术

目前 GIL 的连接技术有：

- 由螺栓和 O 型密封圈连接的法兰；
- 焊接；
- 压接。

合适技术的选择取决于要求，由螺栓和单 O 型密封圈连接的法兰已经在 GIS 中用了 40 多年，质量和可靠性都已得到证实。长距离应用的缺点就是 GIL 安装时现场手工工作量太大。法兰技术用于形成受压气室的外壳连接。

对长距离来说，自动轨道焊接系统给出了现场工作量减少以及良好的可重复质量包括超声质量保证系统。焊接技术可以用于气密外壳连接以及导体管的电气连接。

压接技术可用于导体的电气连接，压接技术也是为人熟知并具有高可靠性的。压接和螺栓以及单 O 型密封圈连接的法兰连接一样，都是手工连接的。压接技术



图 3.3.12 GIL 与架空线的连接
(由 Alpiq Suisse SA 授权提供)



图 3.3.13 隧道内 700m 半径的弯曲
(由 Alpiq Suisse SA 授权提供)

可以设计成标准化的连接工序来简化现场工作量。

有一种对现场应用来说非常牢固的新技术是搅拌摩擦焊接，这种焊接工艺使用一个搅拌器来产生热量使铝材融化形成全形连接。这种技术的优点是：速度快，不受湿度和空气运动影响。

3.3.10.1 法兰连接

气体绝缘开关设备的连接技术是由螺栓和单 O 型密封圈连接的法兰，这种技术已经很成熟并在上百万个连接中证明是可靠的。

法兰连接技术在很多 GIL 项目中得到应用，主要在系统长度不长并从变电站延伸出来的场合（见图 3.3.14）。

3.3.10.2 电弧焊连接

电弧焊是在管线和电厂应用广泛的技术。对变电站以及长距离应用时需要使用铝管，铝管的焊接与钢管不同，焊接参数也必须改变。轨道焊接技术的焊接工艺是高度自动化的，在现场焊接过程中只有少数参数会受焊接工程师影响。为保证 GIL 的气密性，轨道焊接要焊数层^[76,79,107]。

应用

外壳管轨道焊接需保证气密性和机械强度，在焊接开始前较短时间需对焊缝进行准备以防止铝表面氧化，如图 3.3.15 所示。

准备好的管子用夹具固定好使焊缝对准，管子之间对好中心并用焊接环来对中，选用的焊接工艺为钨极气体保护焊（TIG），这种工艺在环境条件随天气改变的情况下也能在现场得到好的焊接结果。

全部质量测试表明 TIG 工艺可以实现轨道焊接满足气密性和机械强度的要求，焊接时需要用一个帐篷来保护焊接工艺不受空气流动的影响。

轨道焊接需尽可能自动化来为外壳管和导体管提供无失效的、标准化的和可复制的焊接。弧焊包括 95 个不同的参数，对给定的材料、壁厚和直径的焊接工艺需要进行优化；91 个参数在轨道焊接机的控制电脑里是固定的，剩下 4 个参数是焊接技师手动控制的（焊头速度、焊线速度、电弧电流以及焊接电流脉冲时间），如图 3.3.16 所示。

把焊接对象从外壳换到导体时仅需要把焊接头的固定环和控制电脑的软件进行切换（见图 3.3.17）。

3.3.10.3 搅拌摩擦焊连接

搅拌摩擦焊接（FSW）是 1991 年研发并申请专利的，开始是用于平板直焊缝，现在也用于管道。FSW 用环绕管子基架内由液压装置驱动的搅拌摩擦头，管子可以用 500mm 或 600mm 直径的 $AlMg_3$ 或 $AlMg_{4.5}$ 。



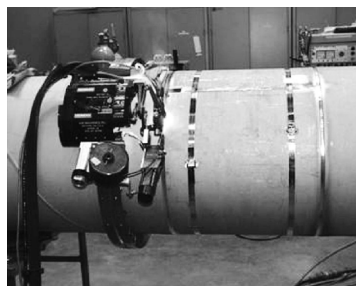
图 3.3.14 法兰连接
（由 Alstom Grid 授权提供）



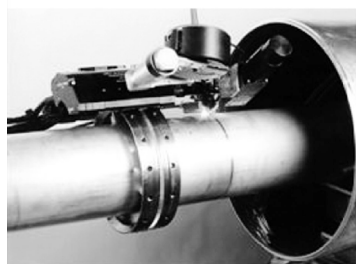
图 3.3.15 焊接准备
(由 Siemens AG 授权提供)



图 3.3.16 焊接技师控制的轨道焊接工艺
(由 Siemens AG 授权提供)



a)



b)

图 3.3.17 轨道焊接过程: a) 外壳管;
b) 导体管。(由 Siemens AG 授权提供)

FSW 的主要优点焊接速度快, 因为管子的整个壁厚可以一次性焊接完成, FSW 焊接工艺与周围空气条件无关。空气流动不像电弧焊接那样影响焊接工艺。EN288 标准给出了质量要求。FSW 焊接比电弧焊接节约时间约 40%。

FSW 并不是融化铝来连接管子, 它是在液态温度以下工作。铝材料被软化并在液化之前连接材料。

FSW 使用抛光的钢制圆柱形工具, 当它旋转到铝材内部时通过产生摩擦热量使材料软化并把软化的材料混合。旋转的钢制工具沿管道的圆筒形方向运动使材料软化, 旋转工具过去后材料冷却形成两个管子的固体连接。图 3.3.18 是原理图^[104,105]。

FSW 用机械力由旋转钢制工具的摩擦产生热来软化材料并连接管子。500mm 和 600mm 直径 8mm 壁厚的管子已经成功连接。为了使机械力进入材料需要环绕管子的夹具来防止管子变形, 第一个环用来引导 FSW 头沿管子运动, 第二个环用来保持管子为圆形。软化材料所需的力来自 FSW 头的前进速度以及转动速度。

FSW 工艺是由液压装置的电子控制来实现自动化的, 夹持 FSW 头和照相机的环可以分开沿管子安装。图 3.3.19 示出 FSW 轨道焊机, 当 FSW 焊头进入材料时一体化照相机控制焊接的开始。

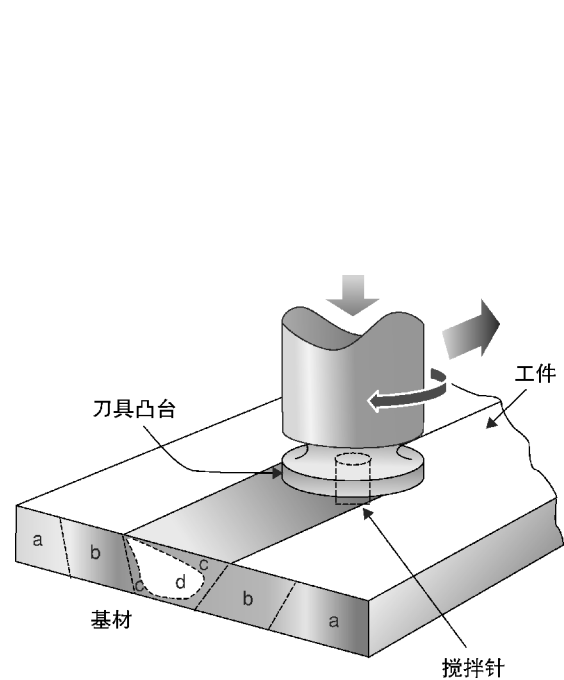
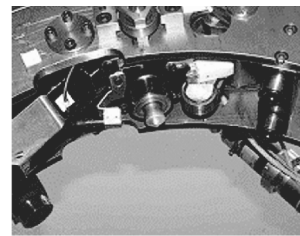
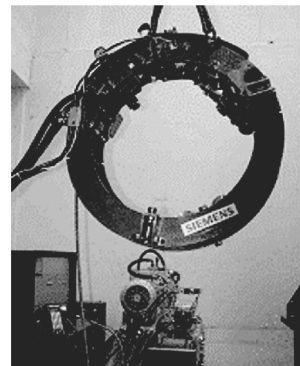


图 3.3.18 搅拌摩擦焊接原理 (由 Areva 授权提供)



a)



b)

图 3.3.19 搅拌摩擦焊环包括焊头和控制照相机：a) 焊头；b) 焊环。(由 Areva 授权提供)

铝管交付时的直径公差为 1%，这对 FSW 工艺来说太大了，因此对管子的焊接端需整形到更好的公差。这是用液压膨胀工具把管子端部整形到要求的公差来实现的（见图 3.3.20），在 50MPa 液压压力下可以达到准确的直径。

600mm 直径的管子塑性变形端部膨胀 30mm，膨胀之后的直径公差小于 $\pm 0.4\text{mm}$ 。

损失焊环

铝管不能承受从 FSW 头来的机械力，因此要把损失焊环放入铝管内以防止管子变形。这个钢环称为损失是因为它在焊接完成后会留在管子内，在铝管加热时把钢环放在里面，铝管冷却后与钢环形成牢固连接。

FSW 工具头

FSW 工具头使用抛光的有螺旋形的钢柱，旋转时位置在 $2^\circ \sim 4^\circ$ 角来产生向前运动，旋转速度和向前运动需要根据铝材料和管子壁厚来协调。

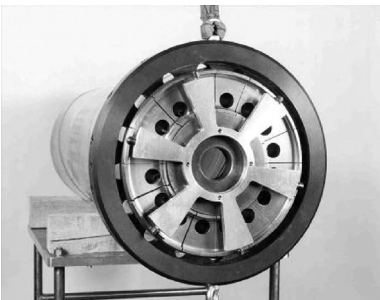


图 3.3.20 用于焊接准备的扩张工具 (由 Areva 授权提供)

封闭孔端

为了在端部封闭焊缝必须在 FSW 工具头从材料中旋转出去时移动它，这个动作是由夹持工具中的台阶来控制的。

焊缝试验

焊缝质量可由 X - 射线或超声手段来检查，这些方法可以检查出内部孔隙并对焊接的正确质量给出指示。这些试验在每一个成品焊缝上都要进行。为了验证焊接工艺，还要对成品焊缝进行切片并在显微镜下观察。由这些研磨样板可以看出焊接工艺的正确性，如图 3.3.21 所示。

机械强度根据标准规定进行抗弯试验，抗弯试验可以看出材料的薄弱处，所有这些试验通过后才认为焊接工艺得到了验证。

为在铝管上得到质量可接受的焊缝可以对旋转速度和前移速度进行调节，典型值为 $20 \sim 120 \text{ mm/min}$ 以及每分钟 $300 \sim 500$ 转旋转速度。此外，旋转头的长度和大小对焊接质量也很重要。根据壁厚，旋转头应比壁厚短。

3.3.10.4 超声试验

每个焊缝的质量控制是由超声试验来实现的。超声试验头固定在焊缝上的导向环上并沿管子的轨道焊缝移动来检查整个焊缝（见图 3.3.22）。每个焊缝都保存

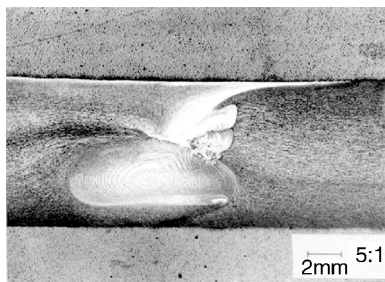


图 3.3.21 搅拌摩擦焊接
研磨样板（由 Areva 授权提供）

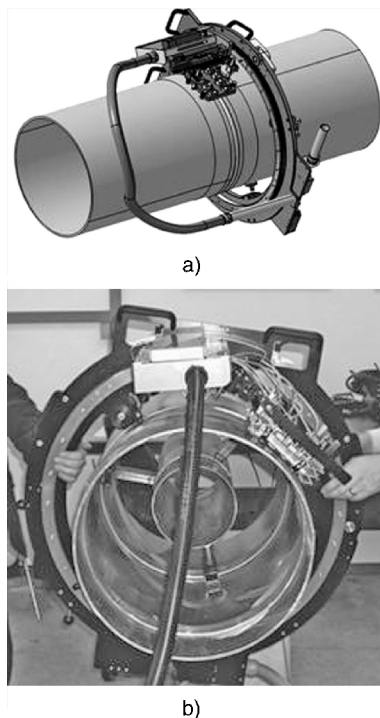


图 3.3.22 焊缝的超声检查 a) 原理；
b) 设备。（由 Areva 授权提供）

100% 的焊缝检验报告，如超声试验检出失效，该区域由手工焊来修补。

3.3.11 防腐蚀

与其他直埋金属装置类似，对土壤中直埋的 GIL 来说，防腐涂层绝对是必需的。主动腐蚀保护，也称为阴极保护，可以作为被动腐蚀保护附加的质量保证系统，来防止涂层可能发生的失效。被动腐蚀保护的失效可能在系统全寿命周期中因其他土壤施工造成的外部伤害或材料中的裂缝或孔隙引起，然后，主动腐蚀保护系统保护这些被动腐蚀系统的裂缝或孔隙使其不受腐蚀。本节提出若干使用被动和主动腐蚀保护的解决方案来保护 GIL 免受腐蚀。

3.3.11.1 被动腐蚀保护

对于在空气中应用于地面或隧道中的铝管来说，铝会产生氧化层来保护外壳免受任何腐蚀。铝管的氧化层非常薄——只有几分之一微米，但是硬度很高，在空气中耐受气体能力也很强。在大多数情况下，甚至于在户外应用时，都不需要用涂料等来保护铝管使其免受腐蚀^[106]。

当应用于地下直埋系统时，腐蚀状况发生戏剧性变化，与湿度、水分以及各种化学元素的持续接触会破坏铝管的氧化层然后造成腐蚀。与钢管不同，铝管的腐蚀不会在一个区域内扩散，而是高度集中在氧化层被破坏的地方，最后，腐蚀会在外壳上形成小孔。为避免这些腐蚀需要有腐蚀保护系统（见图 3.3.23），目前主要有两种方法：被动腐蚀保护和主动腐蚀保护。被动腐蚀保护系统是增加一层不腐蚀的材料，如聚乙烯（PE）或聚丙烯（PP），而主动腐蚀保护系统用保护铝外壳的电压保护水平接近电极的方法。



图 3.3.23 焊接区域的现场

3.3.11.2 主动腐蚀保护

用主动腐蚀保护法时感应电流在金属外壳与土壤间产生电势，如果这个电压水平相对牺牲电极在 1V 左右，牺牲电极就会被腐蚀而铝外壳不会。主动腐蚀保护系统是对被动腐蚀保护系统的补充，主动腐蚀保护系统作为被动腐蚀保护系统补充的质量保证系统在涂层损坏时起作用。被动腐蚀保护的失效可能在系统全寿命周期中因其他土壤施工造成的外部伤害或材料中的裂缝或孔隙引起，然后，主动腐蚀保护系统保护这些被动腐蚀系统的裂缝使其不受腐蚀。

直接布置在地下的直埋管道系统世界范围的经验表明：地下敷设系统的腐蚀保护在数十年中会发生裂缝或孔隙，并使主动腐蚀保护系统的感应电流增加。这样，主动腐蚀保护系统的积极效应表现在不是每个失效都需要立即修理，而使被动腐蚀保护系统 30 年的保证时间可以延长很多年。

防腐蚀——收缩法
(由 Siemens AG 授权提供)

主动腐蚀保护系统也称为阴极腐蚀保护，用感应电流来把对牺牲电极的保护电压调节到 1V 左右。为了达到 1V 的保护电压，需要约 100mA 的感应电流，感应电流与被保护的面积之和有关，并会随系统长度和失效数量的增加而增加。实际上由于电流很小，可以用一个直流电压源来实现数公里的保护。

在美国的输电站内直埋 GIL 已经运行了 20 年以上。

在柏林的 IPH 试验场西门子安装了约 100m 长的直埋 GIL，三家德国公用事业公司组成的联合体对这段 GIL 进行了试验。样机的目的是为了进行系统模拟 50 年的长期运行试验。在这个长期运行试验中，对被动和主动腐蚀系统也进行了试验。该试验装置如图 3.3.24 所示。图片上部示出了该装置的现场情况，左面 GIL 通过竖井与高电压大电流源连接，然后 GIL 以 400m 的弯曲半径向侧下方弯曲并与改变方向的转角模块相联。见侧视图，图 3.3.25 的上半部分和顶视图，图 3.3.24 的底部。试验装置一直延伸到另一个竖井^[108]。



图 3.3.24 100m 长直埋 GIL 的试验装置（由 Siemens AG 授权提供）

沿着试验装置布置有温度传感器（传感器 T01 至 T14）、内部压力传感器（传感器 P01 至 P14）、位移传感器（传感器 B1 至 B6），最后是竖井端部阴极腐蚀保护的连接线。直埋 GIL 的长期运行试验是按实际现场条件进行的。有腐蚀保护的 GIL 布置在沙地上，敷设工作完成后用泥土回填。

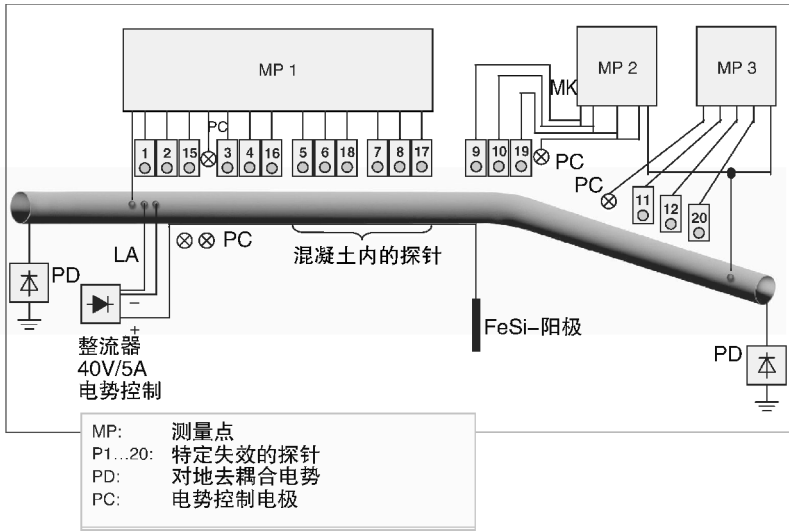


图 3.3.25 包括温度、压力和位移传感器的防腐蚀保护监视（由 Siemens AG 授权提供）

3.3.12 现场装配工作

由于 GIL 段运输到现场有很多困难, 因此 GIL 段的预装配不是在工厂完成的, 成本和损坏的风险都很高, 这也是当需要建设长距离大型项目时需要在靠近现场的地方制作 GIL 段的原因。这样就把单个元件直接运送到现场, 在可移动的装配帐篷里装配。现场条件必须与工厂的清洁厂房一样。装配帐篷的清洁条件是严格控制的, 高压气室必须进行防尘和防湿保护, 外壳管保持封闭状态以防颗粒和灰尘, 只在需要连接时打开^[103]。

用这种方法可以在现场实现较高的生产率, 这对 10km 及以上的长度是必要的。

为了满足高压设备必需的清洁要求, 需要在装配帐篷内确定一个特别的装配区域。产生金属颗粒的区域与高压装配区要分隔开来, 必要时需用空调设备来控制粉尘和湿度。准确采用装配步骤满足清洁要求。

现场装配帐篷的位置取决于现场条件。帐篷可以放在隧道、隧道竖井内, 或在直埋时放在沟内或沟边。现场装配的要点是清洁, 装配过程的每一步都需要保证清洁。现场条件的解决方案可以有很大不同, 在任何情况下都需要在工作开始之前做计划和设计。

3.3.13 监测

为了监视和控制 GIL, 需要安装二次设备用来测量气体压力和气体温度, 应用的元器件与 GIS 是相同的。在调试时应用了灵敏的超高频局部放电测量方法。

在 GIL 端部装有用于电弧定位的电气测量系统, 通过测量电信号, 发生概率很低的内部故障的位置可以被电弧定位系统 (ALS) 计算出来, 精确度可达 10m^[111,112]。

GIL 的监测与 GIS 非常相似, 测量气体压力和温度来计算高电压绝缘所需要的密度。在调试时用局部放电检测系统来识别绝缘系统的内部失效, 局部放电检测系统可以识别出绝缘子是否损坏, 导体和外壳表面是否有损伤, 或 GIL 内部是否有颗粒。如果有这些迹象, 可以在大容量运行之前发现这些失效, 防止发生大规模失效。为了确定内部电弧发生的准确位置, 有必要配置持续电弧定位监测系统。电弧定位系统由 GIL 的行波触发并可以 10m 的精度计算出故障位置, 这是为了快速报告流程的重要信息内容。这些信息在控制中心自动显示。测量的传感器是放置在 GIL 端部法兰内的 VHF 天线^[76,101,110]。

绝缘气体的湿度由气体探测器来测量。GIL 安装时气室充有 SF₆ 或 N₂/SF₆ 混合气体, 湿度测量的露点设定为 -20℃。为达到这个低湿度水平, 气室预充以干燥 N₂ 并用干燥设备循环直至气体露点达到 -20℃ 以下。充气以后进行气体测量, 隔几天再次进行测量, 以检验气体在初次干燥以后湿度是否会回升。湿度回升表明绝缘件内有水分并缓慢释放出来。气体绝缘系统 40 余年的长期运行经验表明, 一旦

水分稳定, GIL 在整个寿命周期是没有问题的。目前的使用寿命是 50 年, 但经验表明实际使用寿命可以更长^[47,103]。

图 3.3.26 给出了 GIL 监测系统组件的概况。

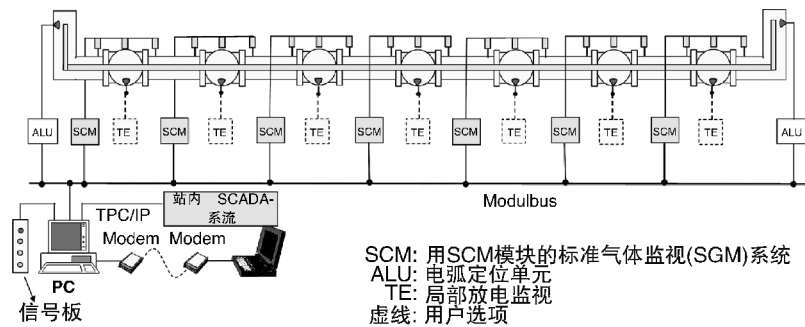


图 3.3.26 GIL 监测系统的组件（由 Siemens AG 授权提供）

3.3.13.1 气体密度监测

气体密度是保证电气绝缘的物理量, 气体密度可以通过气体压力和温度计算出来。当泄漏造成气体密度下降时, 监测系统会先发一个报警, 如果气体继续泄漏, 监测系统会发一个命令使 GIL 停运。GIL 有两个技术指标, 第一个指标是, 例如充气压力以下 10kPa; 第二个指标是, 例如充气压力以下 20kPa。典型的充气压力是 0.8MPa。

为了简化气体密度测量, 在大多数情况下密度值不是以绝对值来表示的。系统处于正常情况的指示就用绿色来表示, 密度在漏气报警时的指示就是绿色和红色的转换, 最后, 当输电线停运时, 指示全部在红色 (见图 3.3.27)。

3.3.13.2 局部放电监测

局部放电 (PD) 监测是控制和检查高压系统绝缘完整性的方法, 用不同的物理性质检查局部放电有不同的方法。传统的方法用电气系统对地连接的高频电抗来测量内部局部放电产生的信号, 典型的局部放电的电流只有几个纳安, 这代表作为视在放电量的容性替代负荷只有几个皮库。

第二种方法是基于气室或绝缘件中局部放电产生的声波, 通过在金属外壳上安装的传感器可以测量声波。

有一种非常灵敏的测量方法是超高频 (UHF) 方法, 用高压气室内的天线直接测量气体或绝缘件中局部放电产生的射频信号。这种方法是最灵敏的方法, 在 GIL 这样的长同轴气室中也最容易采用。

从外部只能看到天线的连接器, UHF 天线安装于隔离模块盖板法兰内 (见图 3.3.28)。

灵敏的 UHF 局部放电测试技术是 GIL 现场安装以后检查高压质量的重要质量手段。长期的局部放电测量是不必要的^[70,112,214,219]。



图 3.3.27 气体密度监视元件，应用指示：
绿色 - 正常（表盘右面）；红色 - 报警（表盘
左面）（由 Siemens AG 授权提供）



图 3.3.28 法兰外壳板上的 UHF 天线
连接器（由 Alpiq Suisse SA 授权提供）

3.3.13.3 电弧定位系统

内部电弧故障定位通过测量从电弧发生处到 GIL 端部行波的时间差来进行，在物理长度及电脉冲传播时间已知的情况下，在 GIL 两端用不同的行波到达时间可计算出确切位置。时间的精确度为 80ns，位置的精确度为 $\pm 25\text{m}$ ，和 GIL 的长度无关。时间的同步可以通过系统时钟或 GPS 时间信号来实现。结果显示在控制中心。

图 3.3.29 是电弧定位系统的原理图，通过电波在 GIL 内部的传播时间来计算电弧位置。A 点和 B 点之间 GIL 的长度是已知的，电波的传播速度，例如内部电弧（闪电符号）也是已知的，接近光速。

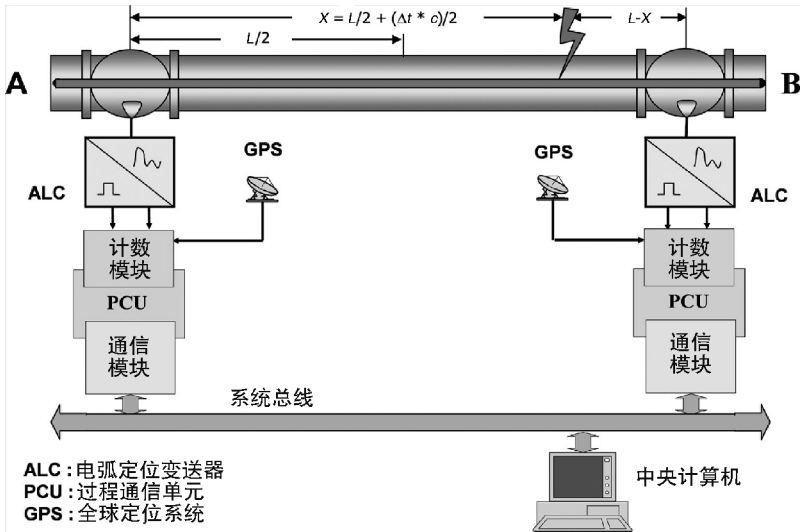


图 3.3.29 电弧定位系统（由 Siemens AG 授权提供）

根据电弧位置到 A 点和 B 点的距离是确定的。两端的传感器,叫做电弧位置变送器 (ALC),把 GIL 内部的行波转换为触发信号,触发信号触发时间计数模块的 GPS 时基同步器。过程通信单元 (PCU) 把时间计数模块的时间触发信号送到中央计算机,后者把电弧位置 (闪电符号) 计算出来并且显示在控制中心的线路图中。

这些定位工作在数秒钟内完成,这样操作人员马上就能知道内部电弧发生的位置,这些信息对维修工作的策划和执行非常重要。

3.4 质量控制和诊断工具

质量控制和诊断工具用于保证 GIL 现场的正确安装,避免或者纠正装配造成的故障。如 3.1 节所述,对 SF_6 和 N_2 混合气体的测量表明,混合气体对故障 (例如刮痕或尖角周围不均匀的电场) 的敏感性,与纯 SF_6 气体相似。这就意味着,在处理以纯 SF_6 气体为介质的绝缘系统失效时所获得的经验可用于 N_2/SF_6 混合气体。

与纯 SF_6 相比, N_2/SF_6 混合气体中的金属表面粗糙度是相同的,或者在绝缘强度上有所降低^[59],而大的金属尖端或者运动颗粒更为敏感^[75]。GIL 内部运动颗粒的大小和数量必须在限定范围内。为了满足这个要求,装配过程要遵守洁净装配的规定, GIL 还要设有捕捉颗粒的陷阱。

所有混合气体以及绝缘强度相同的纯 SF_6 气体的击穿电压在统计上的分布相似^[61]。因此, GIS 的常规试验流程也可用于确认所要求的耐压水平^[59]。扩建的输电线路的绝缘配合,则应适用威布尔分布^[91]。

通过认真仔细的装配工作和有效的质量控制,会大幅度减少缺陷,甚至可以说消除缺陷。运动颗粒是最易残存的缺陷,一般通过工频耐压试验中的老练程序最终烧掉这些微粒^[76]。在常见的具有复杂绝缘系统的 GIS 设备中,通过逐步提升交流电场强度,使得自由颗粒进入低电位区,这些区域就成了天然的捕捉微粒的陷阱。而 GIL 主要由外壳和导体构成,绝缘系统简单,不带有天然的捕捉微粒的陷阱。因此, GIL 在全程通管上都装有人工的捕捉微粒的陷阱,效果非常显著。

在缺陷的检测、定位和识别上采用了最新的诊断技术。UHF (超高频) 法被证明是最为有效的^[76]。但它的应用受到信号衰减和所装探头的有限量程限制。在 GIS 中,信号衰减主要是由于常见的锥形绝缘子造成的。因此传感器之间的最大间距不应超过 20m。在西门子的 GIL 设计中广泛采用的细长型支撑绝缘子几乎不会引起信号衰减,因为在绝缘子所在的位置,整个截面上都是气体,不会阻碍电磁信号的传送。因此,在 GIL 中即使传感器之间的间距达数百米,也可有效地进行 UHF 局放测量。UHF 法因而可以应用在 GIL 上,第一次成功地采用这种方法是在 2001 年的日内瓦 PALEXOP 项目现场^[113]。

由于焊缝的气密性好并且可能含有水分的固体绝缘材料的数量少,在 GIL 中通

过扩散从外壳侵入或者从绝缘件进入到气体的水分比常规的 GIS 少很多。因此，常规的用于避免表面凝露以防止绝缘强度降低的方法，可以有效地保证绝缘件表面的绝缘质量。

总的来说，GIL 的长期性能与 GIS 相同，甚至会更好，即使在运行了 30 年之后，仍有很长的使用寿命，而且不会出现明显的老化，因为 GIL 几乎是使用同一种材料，固体绝缘件和 SF_6 的数量明显减少，并且可通过试验和现代诊断方法做到有效的质量控制^[61]。

3.4.1 零件的质量

GIL 的每个零件都要经过严格的质量控制，既要满足高压要求也要满足相应的功能要求。

绝缘件的生产过程基本上已实现自动化，这就保证了质量的稳定性。在生产结束时，对每个绝缘件都要测量局部放电，要求的局放水平不得高于 GIL 的 IEC 标准所规定的 5pC ^[54]。达到 5pC 的局放水平要求，就证明绝缘件在其使用寿命内不会发生有害的内部故障。

不透气的绝缘件需要耐受约 0.8MPa 的充气压力。根据相关的压力容器标准^[83-88]，对每个不透气的绝缘件进行压力试验。由于与安全有关，所以这个质量试验是强制性试验。

导体管、滑动触头系统及任何金属零件的表面都不能有缺陷。质量检验由具有高压专业知识和经验的专家通过目视进行。高压专业知识是无缺陷装配的基础。

3.4.2 过程的质量

焊接、现场装配和敷设等各过程是现场质量控制过程的组成部分。3.3.10 节对轨道焊接的超声波检测进行了说明。当 GIL 在现场通过轨道焊接的方式组装时，每个焊缝都要用超声波检测设备进行 100% 的质量控制。所有的参数都被储存起来，作为项目文件的组成部分。只有无缺陷的焊接才被放行。如果发现气孔等缺陷，则由手工焊接来修补。

现场装配过程的每一步都有质量检验。在封闭棚内预装 GIL 段，从预装地点运输到敷设地点，以及敷设本身。高电压的原则要求安装工艺合格，也就是保持高压气室的清洁度，避免颗粒或水分侵入气室。

本书不会对质量控制的每一步做太详细的解释，这也是制造商知识的一部分。所有的质量检查都以文件的方式收集在项目文件中，因此归根到底所有 GIL 段的质量结果是可以看得见的。

敷设完毕的 GIL 的最后的的质量检查是现场高压试验，将对 GIL 施加 80% 的设计试验电压。GIL 的优点是投入运行前所有部分都已经通过高压试验。也是为了这个原因，最长段（气室）不能超过 1.5km 。

GIL 的现场试验和长期试验在 3.8 节解释。

3.4.3 局部放电检查

局部放电检查是 GIL 投入运行前检查装配正确性的重要质量检查。为了识别绝缘实效，局部放电试验系统可以在 GIL 的 500m 以内提供高灵敏度的局部放电检查。UHF 天线的频率范围为几兆赫兹到几千兆赫兹，可以在这么长的区域内检测出局部放电。高灵敏度的原因是同心圆柱形的 GIL 是非常好的高频导体，阻抗很低。图 3.4.1 是导体上有尖端的局部放电测量结果。

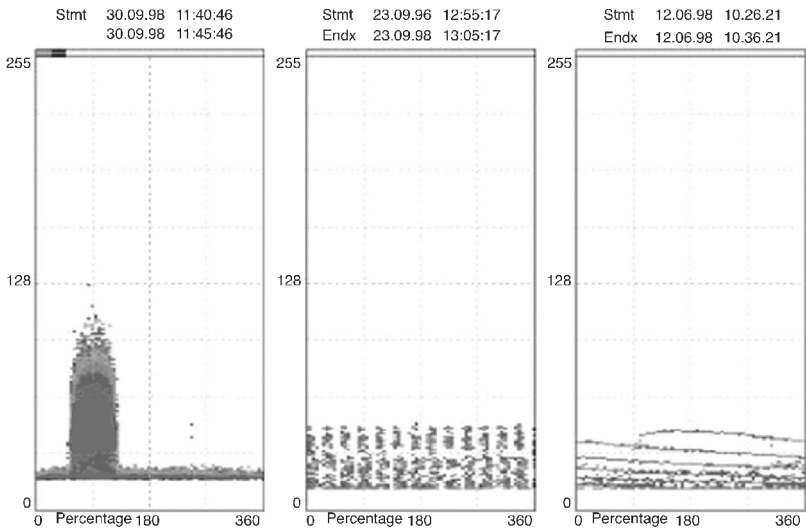


图 3.4.1 局部放电测量。左：导体上的尖端，与天线之间的距离为 70m，中、右：噪声（由 Siemens AG 授权提供）

UHF 法也可用于 N_2/SF_6 混合气体中^[4]。当高压被逐步施加到 GIL 上时，UHF 局部放电测量法能够识别内部的自由移动粒子（例如灰尘）。每次升高电压时都会探测到一定强度的局放，而几分钟后局放就会消失。原因就是这些粒子会被前面所提到的微粒陷阱所捕捉。在调试时进行局放测量，可以确保高压在开始时能正常运行。一旦正式投入使用，就不再需要进行局放测量^[112,214,219]。

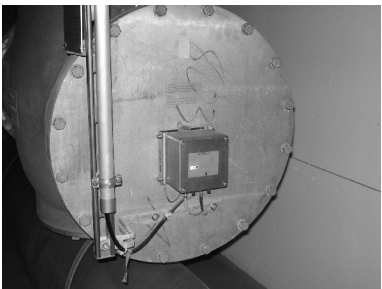


图 3.4.2 用于局部放电测量的

用于测量局放的 UHF 传感器通过位于一段 GIL 端部的板安装在 GIL 内部（见图 3.4.2）。UHF 传感器（由 Siemens AG 授权提供）UHF 传感器连接到一个可承压的电气连接器上。UHF 传感器的功能类似天线，从外部通过电气调节对它进行设置，使其达到正确

的测量波段（数百兆赫）。它们通过同轴导线连接到测量放大器和分析电脑系统上。

3.4.4 现场高压试验

为了消除可能引起运行时发生内部故障的隐患（在搬运、运输、贮存和安装时造成的损伤），应检测 GIL 的绝缘强度。由于目的不同，这些测试不能取代型式试验或工厂的例行试验。它们是对例行耐压试验的补充，目的是检查安装完成后绝缘的完整性并探测前面所述的不正常现象^[115]。

在进行现场试验时，根据试验设备的使用条件，GIL 可分成若干段。

在选择恰当的电压波形时，应参考 IEC 60060-1^[116]；但是，类似的波形也是允许的。优先选择交流，在施加试验电压的过程中监测局部放电。根据 IEC 60270^[117] 进行的常规局放测量并不总是适用。其他方法，例如 UHF 法，也应考虑。

在许多情况下，也进行附加的冲击试验。以下是在选择波形时要考虑到的几个方面。图 3.4.3 中是 GIS 现场试验采用的典型的冲击电压，如此它也被用于 GIL。

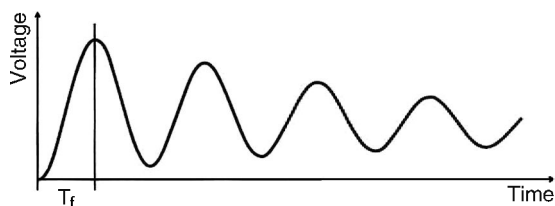


图 3.4.3 用于现场试验的振荡冲击电压： t ，时间； T_f ，波头； V ，电压

用于这种振荡冲击电压的试验和测量设备相对较轻，易于搬运。它由常规的脉冲发生器、长的单层线圈以及阻尼电阻和放电电阻组成。试品的电容和充油电抗器一起决定了串联谐振频率。

从 GIS 缺陷的电气研究可知，冲击脉冲是检测导体尖端凸起和绝缘件表面颗粒的最合适的方法。对长的试品来说，波头长度必须足够长，使得行波现象的影响保持较低水平，从而使整个试品保持在同一电压幅值。

以下举例（见图 3.4.4）说明了这种现象^[47,76,114,116]。被试 GIL 段的长度假设

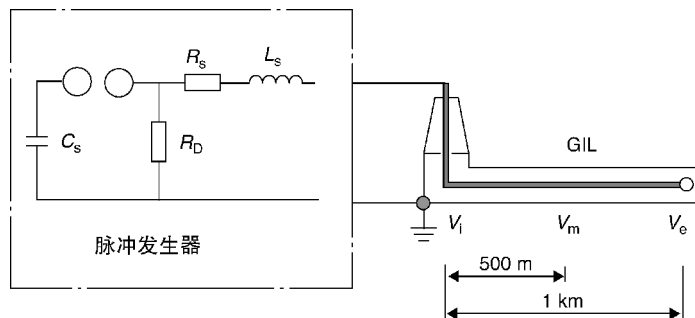


图 3.4.4 振荡冲击试验回路

为 1km，波头通常为线圈电感所决定。初次计算使波头稍微大于 $10\mu\text{s}$ ，计算数据如下：

- 冲击电容 C_s 1.2 μF 充电到 1pu
- 线圈电感 L_s 0.2mH 或 1.7mH
- 阻尼电阻 R_s 20 Ω
- 放电电阻 R_D 100 Ω
- GIL 波阻抗 55.4 Ω

图 3.4.5 显示在 GIL 试验段电压输入点、GIL 中点以及 GIL 端点的电压计算结果。很明显不同部位的电压幅值差是不能为试验目的所允许的。

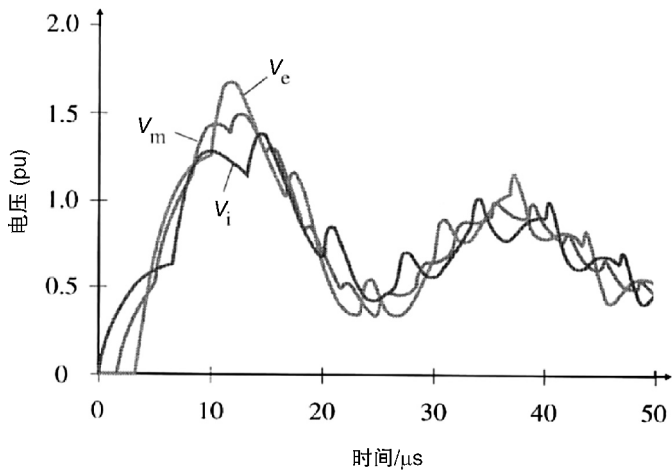


图 3.4.5 $L_s=0.2\text{mH}$ 时在 GIL 三个不同位置处的电压：

V_i ，GIL 接入点的电压； V_m ，GIL 试验段中间的电压； V_e ，GIL 试验段末端的电压

因此用一个 1.7mH 的线圈电抗进行了重新计算，所有其他参数都和之前一致，图 3.4.6 显示了电压结果 V_i 、 V_m 和 V_e ；对现场试验来说幅值的变化足够小。

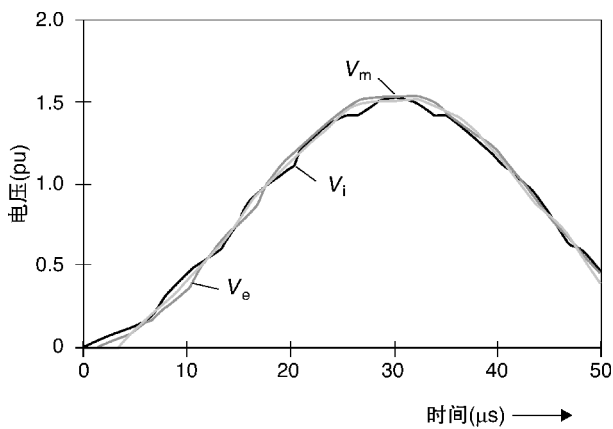


图 3.4.6 $L_s=1.7\text{mH}$ 时在 GIL 三个不同位置处的电压： V_i 、 V_m 和 V_e 差距不大

图 3.4.7 是用卡车运送到现场的现场高压试验设备，试验设备的尺寸和体积决定了 GIL 试验段的长度。单相 GIL 典型的电容为每公里 $55\mu\text{F}$ ，按目前试验设备的能力可以试验的最大长度为 1.5km。



图 3.4.7 现场高电压试验设备
(由 Siemens AG 授权提供)

3.4.5 质量控制结论

质量控制和诊断工具有以下几方面结论：

- 用含 10% ~ 20% SF_6 的 N_2/SF_6 混合气体的 420kV GIL 进行的样机试验表明高压绝缘能力和 100% 的 SF_6 相当，包括树脂绝缘件；
- 用视频照相机和声学传感器等容易得到的仪器组成的监测设备在实验室试验中证明是可靠的；
- 现场试验的 GIL 长度应尽可能长，但实际上的试验长度受交流试验设备的容量以及快速上升的冲击电压的电压同一性要求决定。

气体绝缘技术已经积累了 40 多年的知识，对零件和工艺的质量也有充分的理解，也有很多现成的诊断工具。这些知识应用在 GIL 的现场装配上保证了高质量以及 GIL 的可靠运行。

3.5 规划问题

以下列出了项目实施前应该进行评估和讨论的一些问题。这些案例来自于实际经验，但不能一一涉及到每个需要检查的项目。建议在项目初期就和气体绝缘金属封闭输电线路 GIL 的供应商商讨好每个项目的规划。以下列几个问题为例。

3.5.1 电网的影响

GIL 对电网的影响是潮流、瞬态电压和频率研究的一部分。这些研究又是供电系统和电网研究的一部分，对操作期间或是故障发生时，验证气体绝缘输电线路规划在任何情况和条件下的功能非常必要。对 GIL 这种类型的输电线路的基础研究如表 3.5.1 所示。

以下计算都是在并网条件下进行的^[110,118,124]。

3.5.1.1 并网规则

并网规则是由电网运营商为保证电网连接制定的强制性要求。GIL 的两端确定为两个连接点。这些点可能会因 GIL 所在的位置和作用而有所不同。可能存在一个单向或双向的潮流。这些连接点的规则也有可能有所不同。一个广泛应用的标准的要求是第一象限功率因数为 0.95 ~ 1。经电网运营商允许后方可使用较高的无功

基于项目的具体条件，并且可能会变得非常复杂。如今，可以利用软件来进行这些计算，并且能建立不同网络条件下的模型^[121-123]。

为了说明这个原理，下面给出了一个简单的例子（见图 3.5.2）。在本例中，5 个总功率为 2000MVA 的大型海上风力发电场由一个 60km 长的 GIL 大功率传输线路从近海连接到陆地，并与电网相连。

GIL、海底电缆和变压器的技术参数如表 3.5.2 ~ 表 3.5.4 所示。

计算出了如下条件下的负载情况：满负荷、半负荷、无负荷和无功功率。

3.5.1.2.1 满负荷计算结果

满负荷（2000MW）计算的结果如表 3.5.5 所示。

GIL 及变压器的总损耗为 23.68MW，电网无功功率要求为 16.48Mvar。

在电网连接点以负荷系数 $\cos\varphi = 1.0$ 来计算，该值正好合适。

这个满足了电网连接条件。不需要额外的无功补偿功率。GIL 及变压器的总效率为 98.82%。

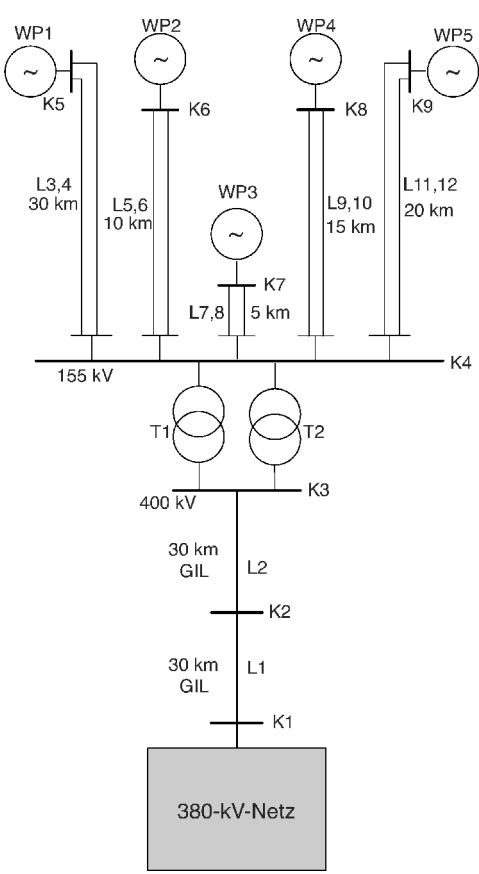


图 3.5.2 5 个总功率为 2000MVA 的大型海上风电场由一个 60km 长的线路，从近海汇集点（K3）连接到陆地的输电网^[118]

表 3.5.2 选定的 GIL 技术参数^[118]

名称	单位	值
电阻 R'	mΩ/km	9
电感 L'	mH/km	0.215
电容 C'	nF/km	54.45
电导 G'		可忽略
热极限电流	A	3000

该结构的计算如图 3.5.2 所示，它被分成了 9 个节点，如表 3.5.6 所示。

表 3.5.3 155kV 海底电缆技术参数^[118]

名称	单位	值
截面积	mm ²	800
电阻 R'	mΩ/km	31.9
电感 L'	mH/km	0.54
电容 C'	nF/km	210
电导 G'	nS/km	65.97
热极限电流	A	775

表 3.5.4 汇集变压器技术参数 (T1 和 T2)^[118]

名称	单位	值
额定功率	S_{T} (MVA)	1000
变比	i	400/155
开关组	Yy0	
相对短路电压	u_{k}	15%
额定电流的阻性损耗	P_{k} (kW)	1000
相对空载电流	i_1	0.3%
高压侧分接开关		在 ± 7 步中有 $\pm 7\%$

表 3.5.5 满负荷下 (2000MW) 传输损耗和无功功率要求^[118]

名称	单元	值
总损耗	MW	23.68
总有效因数	%	98.82
总无功功率	Mvar	16.48
联网点 $\cos\varphi$	Ind.	1

表 3.5.6 节点定义^[118]

节点	解释
K1	陆地上网络连接点
K2	GIL 的中点 (30km 处)
K3	近海汇集点的 400kV 电压水平点, GIL 侧
K4	近海汇集点的 155kV 电压水平点, 海缆侧
K5	WP1 的 155kV 汇集点
K6	WP2 的 155kV 汇集点
K7	WP3 的 155kV 汇集点
K8	WP4 的 155kV 汇集点
K9	WP5 的 155kV 汇集点

这些位置的计算如表 3.5.7 所示。

表 3.5.7 中的值表明，每个节点的电压水平都在可接受的值内。从陆地并网点到近海汇集点的电压略微上升了 0.54%，达到了 402.17kV。

表 3.5.7 节点电压计算^[118]

节点	节点形式	U_K/kV	$\Delta U_K/U_{\text{in}} (\%)$	$\delta (^\circ)$	P_K/MW	Q_K/Mvar	$\cos\varphi$
K1	松弛	400.00	0.00	0.00	1976.32	-16.48	1.0000
K2	PQ	401.17	0.29	1.44	0.00	0.00	—
K3	PQ	402.17	0.54	2.87	0.00	0.00	—
K4	PQ	156.77	1.14	11.31	0.00	0.00	—
K5	PQ	158.65	2.35	13.60	-400.00	0.00	-1.0000
K6	PQ	157.25	1.45	12.09	-400.00	0.00	-1.0000
K7	PQ	156.99	1.29	11.70	-400.00	0.00	-1.0000
K8	PQ	157.55	1.64	12.48	-400.00	0.00	-1.0000
K9	PQ	157.88	1.86	12.86	-400.00	0.00	-1.0000

满负荷下的潮流计算如表 3.5.8 所示。

表 3.5.8 中的值表明，海底电缆电流为 746A，GIL 的电流为 2859A，均未达到满负荷。

表 3.5.8 满负荷下的潮流计算结果^[118]

线路	形式	A - B	长度/km	I_A/A	I_B/A	P_V/MW	Q_V/Mvar
L1	GIL	K1 - K2	30	2853	2855	6.60	-32.86
L2	GIL	K2 - K3	30	2855	2859	6.61	-33.20
L3	155kV	K4 - K5	30	746	728	1.60	-41.07
L4	155kV	K4 - K5	30	746	728	1.60	-41.07
L5	155kV	K4 - K6	10	736	734	0.53	-13.52
L6	155kV	K4 - K6	10	736	734	0.53	-13.52
L7	155kV	K4 - K7	5	736	736	0.27	-6.74
L8	155kV	K4 - K7	5	736	736	0.27	-6.74
L9	155kV	K4 - K8	15	737	733	0.80	-20.33
L10	155kV	K4 - K8	15	737	733	0.80	-20.33
L11	155kV	K4 - K9	20	739	731	1.06	-27.19
L12	155kV	K4 - K9	20	739	731	1.06	-27.19

GIL 两端的电流 I_A 和 I_B 的值几乎相等；这意味着并不需要无功补偿。GIL 的总损耗为 13.2MW，相当于 220W/m。当 GIL 为隧道安装或直埋敷设时，需要进行发热计算以求得温度限制，详见 3.7.3.3 节。

3.5.1.2.2 半负荷计算结果

半负荷（1000MW）计算的结果如表 3.5.9 所示。

表 3.5.9 半负荷下传输损耗和无功功率的要求^[118]

名称	单位	值
总损耗	MW	6.38
总效率因数	%	99.36
总无功功率	Mvar	-315.25
电网节点 $\cos\varphi$	kap.	0.9532

半负荷状态下的无功功率要增加到 315Mvar，与满负荷相比多了 298Mvar。输送容量变小，GIL 到电网的无功功率增加，这与电流变小和电力变压器的影响变弱有关。功率负荷因数降低到 0.9532。这个值在电网连接条件的允许范围内，如图 3.5.1 所示。半负荷条件下不需要无功补偿。半负荷下的总损耗降低到 6.38MW。整个系统的效率是 99.36%。

在表 3.5.10 中列出了对表 3.5.6 中节点电压的分析。

表 3.5.10 节点电压计算^[118]

节点	节点类型	U_K/kV	$\Delta U_K/U_{nN}(\%)$	$\delta(^{\circ})$	P_K/MW	Q_K/Mvar	$\cos\varphi$
K1	冗余	400.00	0.00	0.00	993.62	315.25	0.9532
K2	PQ	402.09	0.52	0.69	0.00	0.00	—
K3	PQ	403.82	0.95	1.38	0.00	0.00	—
K4	PQ	159.03	2.60	5.52	0.00	0.00	—
K5	PQ	160.40	3.49	6.61	-200.00	0.00	-1.0000
K6	PQ	159.32	2.78	5.90	-200.00	0.00	-1.0000
K7	PQ	159.15	2.68	5.71	-200.00	0.00	-1.0000
K8	PQ	159.52	2.92	6.08	-200.00	0.00	-1.0000
K9	PQ	159.77	3.08	6.26	-200.00	0.00	-1.0000

结果表明，所有的节点电压都在要求范围内。GIL 近海汇集点节点 3 的最大电压是 403.82kV。这与 0.95% 的过电压有关。在表 3.5.11 中列出了半负荷下的潮流计算。

GIL 的最大电流是 1505A，海底电缆的最大电流是 402A。所有电流均在允许范围内。半负荷情况运行是可以接受的，没有限制条件。

3.5.1.2.3 空载结果

空载的计算结果如表 3.5.12 所示。

表 3.5.11 半负荷计算结果^[118]

线路	形式	A – B	长度/km	I_A/A	I_B/A	P_V/MW	$Q_V/Mvar$
1	GIL	K1 – K2	30	1505	1472	1.79	–69.09
2	GIL	K2 – K3	30	1472	1448	1.73	–70.39
3	155kV	K4 – K5	30	402	360	0.45	–48.43
4	155kV	K4 – K5	30	402	360	0.45	–48.43
5	155kV	K4 – K6	10	367	362	0.14	–16.04
6	155kV	K4 – K6	10	367	362	0.14	–16.04
7	155kV	K4 – K7	5	364	363	0.07	–8.01
8	155kV	K4 – K7	5	364	363	0.07	–8.01
9	155kV	K4 – K8	15	373	362	0.22	–24.10
10	155kV	K4 – K8	15	373	362	0.22	–24.10
11	155kV	K4 – K9	20	380	361	0.29	–32.17
12	155kV	K4 – K9	20	380	361	0.29	–32.17

表 3.5.12 半负荷下的传输损耗和无功功率的要求^[118]

名称	单位	值
传输损耗	MW	0.79
无功功率补偿损耗	MW	0.63
总损耗	MW	1.42
总效率因数		—
总无功功率	Mvar	–420.03
电网节点 $\cos\varphi$	kap.	0.0019

在空载条件下，当 GIL 和变压器的电感影响最低时，传输到电网的无功补偿最高。为了满足联网所需的电感 $\cos\varphi=0.95 \sim 1$ 的要求，420.03Mvar 的无功补偿增加了损耗^[124]，这将导致 0.63MW 的补偿损耗和 1.42MW 的总损耗。

在空载条件下，除了会把最高的无功功率传递到电网上，费兰梯（Ferranti）效应会导致电压最高。在表 3.5.13 中列出了节点电压以及 GIL 端点的最高电压——节点 3 处为 403.42kV。电压增长了 0.86%，并且在联网条件范围内。

表 3.5.13 节点电压计算^[118]

节点	节点类型	U_K/kV	$\Delta U_K/U_{nN}(\%)$	$\delta(^{\circ})$	P_K/MW	$Q_K/Mvar$	$\cos\varphi$
K1	冗余	400.00	0.00	0.00	–0.79	420.03	–0.0019
K2	PQ	401.92	0.48	0.48	0.00	0.00	–0.9968
K3	PQ	403.42	0.86	0.86	0.00	0.00	0.8155
K4	PQ	159.33	2.79	2.79	0.00	0.00	–0.6026
K5	PQ	160.13	3.31	3.31	0.00	0.00	0.3775
K6	PQ	159.42	2.85	2.85	0.00	0.00	0.4479
K7	PQ	159.35	2.81	2.81	0.00	0.00	0.4549
K8	PQ	159.53	2.92	2.92	0.00	0.00	0.4363
K9	PQ	159.68	3.02	3.02	0.00	0.00	0.4204

在表 3.5.14 中列出了空载下潮流计算。

表 3.5.14 空载下的计算结果^[118]

线路	形式	A - B	长度/km	I_A/A	I_B/A	P_V/MW	$Q_V/Mvar$
1	GIL	K1 - K2	30	606	487	0.24	-80.69
2	GIL	K2 - K3	30	487	368	0.15	-82.10
3	155kV	K4 - K5	30	183	0	0.08	-50.41
4	155kV	K4 - K5	30	183	0	0.08	-50.41
5	155kV	K4 - K6	10	61	0	0.02	-16.75
6	155kV	K4 - K6	10	61	0	0.02	-16.75
7	155kV	K4 - K7	5	30	0	0.01	-8.37
8	155kV	K4 - K7	5	30	0	0.01	-8.37
9	155kV	K4 - K8	15	91	0	0.03	-25.14
10	155kV	K4 - K8	15	91	0	0.03	-25.14
11	155kV	K4 - K9	20	122	0	0.04	-33.54
12	155kV	K4 - K9	20	122	0	0.04	-33.54

空载下的 GIL 和变压器的负荷在允许范围内。

图 3.5.2 所示的 GIL 网络的运行满足陆地上的全部并网要求，对空载条件下安装了无功补偿。

3.5.1.2.4 无功补偿

计算表明，图 3.5.2 所示的电网几乎在所有运行状态下都是电容性的。只有在 2000MW 的满负荷条件下系统具有轻微电感性。

对于并网点，功率的关系如图 3.5.3 所示。

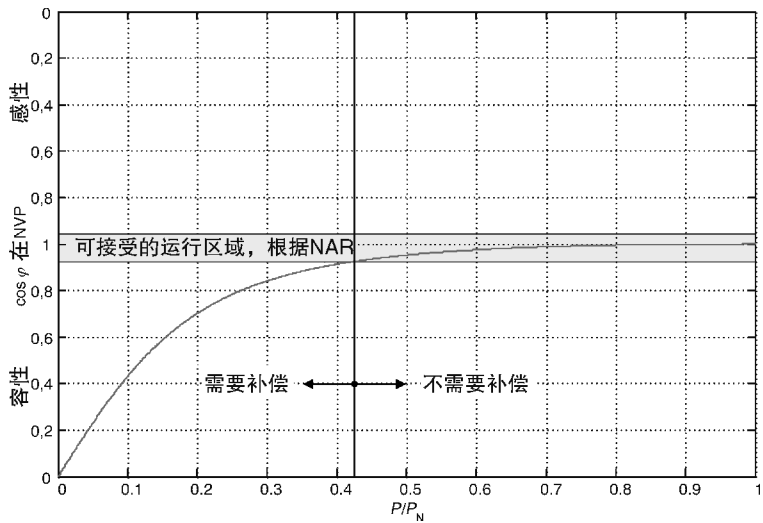


图 3.5.3 取决于功率的并网点的负载因数：NVP，并网点；NAR，德国并网规则^[118]（由 Siemens AG 授权提供）

图 3.5.3 所示的图表表明，负荷系数低于 42.3% 时，必须有无功补偿。为了做出补偿，可以使用一个或多个电抗线圈或灵活交流输电系统。所需的无功功率可

以通过从陆地上的并网点中 K1 节点的补偿单元来输送。所需的无功功率值如图 3.5.4 所示。

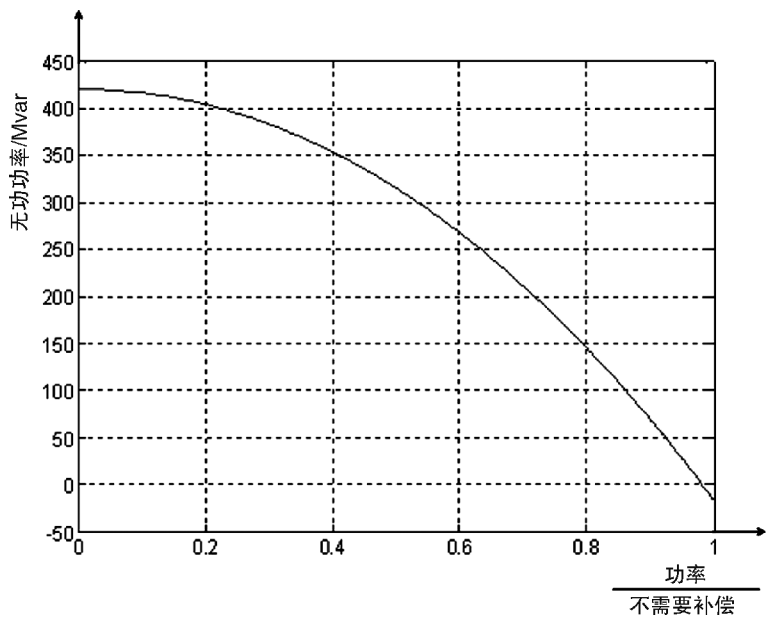


图 3.5.4 陆地上 K1 网络节点的无功功率需求^[118]（由汉诺威莱布尼兹大学授权提供）

这个网络规划计算的结论是，GIL 可用于长距离（这里是 60km）高压输电线路（这里指三相系统 2000MVA）而不需要相角补偿。只有在空载条件下，无功补偿才是并网所必需的条件。另一方面，空载条件并不是真正的大功率输电线路的运行状态^[118]。

3.5.2 可靠性

当需要对输电线路的重要性和可能的电力供应中断的影响做出评估时，可靠性就成了一个规划问题。原则上，GIL 的可靠性可以认为是非常高的，原因如下：

经验

自 1968 年以来，气体绝缘技术已经在全球范围内得到了广泛的应用，在欧洲、北美、阿拉伯国家、亚洲和非洲所有天气情况运行的管道总长已经超过了 300km。其安装方式包括地面架空（约 50%），隧道或敞开式沟渠（约 40%）和直埋（约 10%）；其电压等级分为 145kV（大约 20%），145 ~ 300kV（大约 20%），300 ~ 550kV（约 45%），550 ~ 800kV（大约 5%）。这些年的运行和安装总公里中没有导致电力供应中断事故的报告。这些信息是电气与电子工程师学会电力与能源协会（IEEE PES）电站委员会在世界范围内的主要制造商和用户在工作组中收集的。IEEE 的电力与能源协会电站委员会负责发布关于 GIL 的标准、指南，组织培训和专题讨论会等^[221]。电站委员会经常联合 PES 大会提供 GIL 的培训。

气体绝缘理论

GIL 具有高可靠性这一优点来自于气体绝缘理论。气体绝缘的理论是指绝缘气体是自由运动的, 电子和离子可以自由流动。气体的对流可以传导任何形式的电负荷到导体或地电位, 并且不会造成任何影响。在某一位置存储一个电负荷并且使其随时间增加, 直到绝缘失效, 这种情况是不可能的。GIL 的固体绝缘子需要在相对较低的电场强度下。气体绝缘决定了管道的尺寸。相对介电常数 $\varepsilon_r = 3 \sim 5$ 时, 固体绝缘子可以承受更高的电场强度。这意味着 GIL 的尺寸由气体绝缘特性决定, 而绝缘子承受的压力不大。

气体绝缘的原理是 GIL 具有高可靠性的原因之一。

无移动部件

GIL 不包含可移动的部件, 因此就没有磨损。GIL 的结构包含外壳、导体和绝缘子, 内部没有开关或断路器。唯一的运动来自导体被电流加热后产生的热膨胀。这些非常缓慢和微小的移动被一个滑动触头系统吸收, 该系统保证了终身的可用性, 并且不需要打开维护。

无腐蚀

GIL 一般敷设在隧道、沟渠内, 或是地面架空敷设, 受铝制外壳表面的氧化层保护。该物理/化学反应可以使 GIL 免于腐蚀。

当 GIL 为直埋敷设时, 应当采取主动和被动防腐措施以防止腐蚀。

作为结论, 可以说 GIL 作为一个气体绝缘输电线路, 因其不含移动部件和无腐蚀性的技术设计, 具有非常高的可靠性^[125,126]。

3.5.3 接地

接地是 GIL 设备重要的安全保证。它包括雷击保护以及正常运行和出现故障时的接触保护。GIL 系统在其两端以及每个 GIL 的支承结构, 例如隧道安装时, 均需可靠接地。在隧道中, 地面上或地沟中的金属外壳通过与支撑 GIL 的钢支架可靠连接的方式接地。接地点之间的距离由钢支架的间距以及隧道、地沟中或地面上可能的接地连接决定。每个项目都需要确定这些距离。典型的钢支架间距为 20 ~ 30m。

GIL 的端部要和变电站的接地系统或架空线塔相连。

GIL 为直埋时, 每隔一段约 1 ~ 1.5km 的气室, 都要在地下竖井处进行接地连接。在竖井中, GIL 外壳连接到竖井的接地系统。

从图 3.5.5 中可以看到 GIL 是如何接地的。GIL 的金属外壳支撑在可导电的钢支架上。钢支架由锚栓固



图 3.5.5 GIL 接地

(由 Alpiq Suisse SA 授权提供)

定在墙上。锚拴与加强钢筋或者水泥隧道壁相连。水泥墙壁的加强钢筋与隧道周围土壤中的接地线相连。此原则适用于任何可被人员接触到的 GIL 外壳，以使人员免遭接触电压的电击。GIL 在运行时是一个可靠接地的系统。

3.5.4 安全

原则上，由于其坚实的金属外壳，GIL 是安全的。在正常运行时以及出现内部电弧的情况下不会有危险。

如果发生内部电弧，由于 GIL 没有附加的火灾载荷，也不会产生外部影响，因此不会对周围环境造成危险。GIL 由铝、 N_2/SF_6 绝缘气体和环氧树脂组成。所有这些材料在正常情况下都是不可燃的。这就意味着 GIL 没有增加隧道中的火灾载荷。

在内部故障的情况下，GIL 会发生内部电弧。这是故障中最坏的情况，到目前为止，在过去的 35 年里所安装的 300 多 km 的 GIL 中从未发生过。尽管发生的概率非常低，但是对这种情况还是进行了试验，证明了设备的安全性。内部电弧将会使壳体内部的压力升高，但是没有外部影响。坚固的铝壳体把高温气体隔在了 GIL 内部。这意味着不会增加 GIL 周围环境、甚至隧道内部的危险（见 3.2 节）。

GIL 的高安全性使得 GIL 能够和交通隧道结合在一起（见 7.3 节）。

3.5.5 环境限制

原则上，GIL 满足环境限制。主要环境的限制为：

- 电磁场
- 外壳的温度
- 绝缘气体的气密性
- 可视性
- 农业应用

电磁场

电磁场在新的输电线路的调试过程中起着越来越重要的作用。世界各地确定的极限值都有所不同。德国规定该值为 $100\mu T$ ，瑞士规定该值为 $1\mu T$ ，而意大利规定该值最小为 $0.3\mu T$ ^[158,161,162]。其他国家规定的值也在该范围内，相差无几。通常会添加区域性的要求（如在美国，各州或某些城市都有各自的规定值）。

GIL 的原理设计因其可靠接地的外壳，使其能够满足各种要求——特别是在拥有更少空间和距离的人口稠密地区。可靠接地 GIL 的外壳管道以外的电场几乎为 0，并且没有外部影响。

GIL 外壳管外的磁场很小，因为外壳上有反向电流。两种电流的叠加（导体电流和外壳上的反向电流）会在 GIL 外形成一个小的磁场。导体电流的 5% ~ 10% 对外部磁场的形成有贡献。如今在某些国家对最低磁场的要求下降到了 $1\mu T$ ，GIL 可

以满足该要求，见第 5 章。

外壳的温度

安全规程要求在隧道或地面架空敷设时要规定人员接触温度限制，这也是为了防止在直埋敷设时土壤的干化效应。在产品标准 IEC 62271 – 203^[127] 和 IEC 62271 – 204^[54] 中规定了温度的限值。外壳的最高允许温度取决于铺设的类型，如表 3. 5. 15 所示。

表 3. 5. 15 最高温度

敷设方式	温度
直埋敷设	40℃
可接触的隧道敷设	60℃
不需接触的隧道敷设	70℃

当 GIL 进行直埋敷设时，热量的传导由 GIL 外壳管道和周围的土壤实现。为了避免土壤干化这一不可逆过程，需要增加土壤的导热系数，这就需要使用特殊的回填材料。这些材料与水混合，具有良好的导热系数，通常为砂和粘土的混合物。更好的热导率将提高输送更高电流的能力。在任何情况下，GIL 项目的热力规划和敷设条件需要一一进行计算。热计算的结果将决定额定电流、导体管的壁厚和沟渠回填材料的热导率。在任何情况下，最高温度必须长期保持在 40℃ 以下。

在进行隧道敷设时，GIL 与隧道墙壁的热量传输是通过对流来完成的。这种情况下的温度限值取决于导体和绝缘子的最高温度。为了消除热老化的影响，国际标准推荐的外壳最高温度为 80℃。

在某些情况下，操作人员需要接触 GIL，就把最高温度限制在 60℃。该值旨在为操作人员提供安全防护。

同时，对于隧道敷设，需要对每一个项目进行热计算。GIL 热计算是项目设计的基础。当在设计范围内应用 GIL 时，不需要进一步考虑某些限制，并且 GIL 的运行不会存在热老化的风险。

外壳的气密性

为了防止气体泄露到大气中，GIL 必须焊接为完全气密的，并且需要在封闭的容器中完成对气体的闭环处理。

GIL 中使用的绝缘气体为氮气 (N₂) 和六氟化硫 (SF₆)。绝缘气体大部分为 N₂，含量通常为 80%。N₂ 是一种天然气体，泄露到大气中不会产生不良影响。SF₆ 则不然，该气体为温室气体之一，不能泄露到大气中。而且，SF₆ 比 N₂ 更贵一些。

气密性也是电气完整性的要求。

出于这两个原因，GIL 概念是用气密焊接的完全焊接连接技术。利用自动焊接设备来完成焊接，并且用自动超声波焊接检验系统进行检验。对于长距离传输，GIL 可以分为 1km 长的气体隔室。这限制了 GIL 外壳受损时气体泄漏的风险。

可见性

高压架空输电线路遭到公众的极力反对。为了得到建造许可，审批过程可能持续数年甚至数十年。输电线路像 GIL 一样埋入地下，公众的接受度就较高一些。

未来大规模可再生能源发电的趋势要求缩短连接风电场或太阳能发电厂的施工时间。GIL 的较高成本可在较长的审批时间和不能在市场上出售电力的收入损失取舍。

可见性在人口密集的区域或环境保护地区具有更强的影响。

在某些情况下，架空线与 GIL 结合可能更具优势，这可以简单地通过套管包括过电压避雷器来实现。通过这样的组合，在不具强烈反对意向的农村地区架设架空线，而在人口密集地区或环境保护区使用地下 GIL。

农业应用

GIL 进行直埋敷设后，其周边土壤应可用于农业种植。在 GIL 上方禁止栽种大型树木，以便修理时进入。

对农业应用的限制已经在石油和天然气管道应用多年，并且已经积累了良好的经验。建设期间应对土地所有者进行补偿，以便允许施工现场交通顺畅。当管道需要运行、维护或修理时再对其进行补偿。

对景观的影响主要是在建设阶段。一个或两个 GIL 系统的建造需要开凿一个 3~5m 宽的沟渠，需要移除大量的土壤，存放在别处然后回填。施工时间是有限的；1km 长的模块需要 3~6 个月的时间，具体的施工时间取决于施工地点的可进入性和施工材料（砂、黏土、岩石）的条件。

长距离的 GIL 将被分成 1~2km 长的部分，因此，施工工地应当具有相同的长度。在大多数情况下不存在开挖数十公里沟渠的施工工地。

3.5.6 相角补偿

GIL 的电容大约是架空线的 2~3 倍，比固体绝缘交联聚乙烯电缆小 4~5 倍。当 400kV 的 GIL 长度达到 60~80km，就需要进行相角补偿。具体的长度取决于 GIL 两端的电网条件，计算时需要和电网研究相结合。

如 3.5.1 节中所述，在空载条件和较低无功功率时，就需要补偿。根据并网点的网络条件，需要计算补偿要求。

3.5.7 载荷能力和过载能力

3.5.7.1 综述

GIL 的载荷能力和过载能力是决定其能否适应网络传输变化的重要运行特性。GIL 因其内部具有良好的气体绝缘设计和较大的外壳直径，所以拥有良好的热力学性能。导体电流产生的热量通过气体对流传导到外壳管，这样就能通过较大的散热面积将热量散发到周围环境中。

在进行隧道敷设、沟渠敷设或地面架空敷设时,热量与周围的环境的对流而挥发出去。当埋在土壤中时,热量通过传导的方式传递到土壤中。

在这两种情况下的热传递速度均较快,并且 GIL 温度上升比较缓慢。当 GIL 为隧道敷设时,其时间常数通常为几个小时,这取决于周围空气条件。当 GIL 为直埋敷设时,在达到热学极限前其时间常数可以长达几天,这取决于 GIL 周围土壤的导热系数。除周围的环境空气条件或土壤导热系数外,电力传输条件还决定了过载能力。隧道敷设的热力计算同样可以参见 3.7.2 节,直埋敷设的热力学设计可以参见 3.7.3 节。

这可以覆盖 GIL 的短时过载条件,避免过热风险。当 GIL 在其敷设条件下的热力参数已知时就可以进行计算。

3.5.7.2 环境温度过载计算

这些计算只适用于隧道、沟渠或地面架空敷设。GIL 的直埋敷设方式的计算参见 3.7.3 节。

短时过载可能是因为意外负荷、发电增加,或是系统运行方式改变。GIL 的温度限值由设计决定,并且经过了额定运行条件下的型式验证。需要考虑来自环境空气、土壤导热系数和太阳辐射的外部影响。

IEC 62271-1^[82] 给出了热过载公式,IEC 62271-204^[54] 给出了 GIL 的尺寸。

最大允许温度与 GIL 不同的组件有关。

绝缘气体

GIL 中应用的绝缘气体为 SF_6 和 N_2 。这些气体非常稳定,使用温度可达 500°C 以上。所以,对于 GIL 的绝缘气体并没有实际的限制。

绝缘子

绝缘子由环氧树脂浇注制成。环氧树脂有很多种类型,取决于制造商。环氧树脂绝缘子的最高温度在 $110 \sim 125^\circ\text{C}$ 之间。该值与绝缘子材料有关,在 IEC 62271-204^[54] 或 IEEE C37.122^[128] 已经作了相关的规定。

滑动触头

滑动触头通常是镀银的,用于补偿导体的热膨胀。滑动触头的温度一般低于 105°C 。该值在 IEC 62271-204^[54] 或 IEEE C37.122^[128] 规定了标准值。

热力学布置的主要影响参数是外壳管的直径。在直径确定的情况下,其表面是固定的,则传导到周围环境的热量也是一定的。

热时间常数与 GIL 的直径有关,并且通过型式试验的发热试验测得。标准 40°C 环境空气下 GIL 的热时间常数通常是 3h。为了计算出负荷增加引起的热量增加,必须规定加载前和加载后的条件。通常情况下,要评估峰值负载前后 2~3h 的负载周期。为了限制峰值太阳能负载,GIL 在进行地面架空敷设时应该使用阳光屏蔽装置。

动态负载条件下的计算非常复杂。在大多数情况下,仅允许 1~4h 的过载。

IEC 62271-1^[82]给出了热过载计算方式,包括了连续过载或运行条件改变造成的瞬时过载。IEC 62271-1 表 3 规定了最大温升限值,GIL 上任何部分不得超过限值。考虑到这些限值,可以把 GIL 设定得高于额定正常电流,使其短时过载时也不会达到极限温度值。例如,这种情况下,GIL 运行处的真实环境温度应低于 40℃。

连续和短时过载的计算基于温升试验得到的值和一些试验参数:额定电流、热时间常数、温升、环境空气温度和最大运行温度。下列方程适用于过载能力的计算。

给定环境温度 θ_a 下所允许的连续电流 (I_s):

$$I_s = I_r \left[\frac{\theta_{\max} - \theta_a}{\Delta\theta_r} \right]^{\frac{1}{n}}$$

过载时的工作温度:

$$\theta_s = \Delta\theta_r \times (I_s/I_r)^n \times e^{-t/\tau} + \theta_a$$

或在传输电流 I_i 后所允许的瞬时电流 I_s 时间(f_s)

$$t_s = -\tau \ln \left[1 - \frac{(\theta_{\max} - Y - \theta_a)}{(Y \left[\frac{I_s}{I_i} \right]^n - 1)} \right]$$

$$Y = (\theta_{\max} - 40) \times \left[\frac{I_i}{I_r} \right]^n$$

式中 $\theta_{\max}$ ——表 3 中最大允许总温度 (℃);

θ_a ——实际环境温度 (℃);

$\Delta\theta_r$ ——额定电流 I_r 的温升;

I_r ——额定正常电流 (A);

τ ——热时间常数 (h);

n ——考虑了材料、热辐射、对流等的过载指数;

I_i ——过载电流前的初始电流 (A);

I_s ——过载电流 (A);

t_s ——不超过最大允许温度的过载电流允许通过时间。

一般来说,在过载或允许过载期间,如果决定工作温度的指数 $n=2$ (保守的估计),则不需要额外的温升试验。指数低于 2 时可用于过载额定值计算。必须基于测试数据来进行计算。

瞬时过载的情况如图 3.5.6 所示,在环境温度为 40℃时,较低的过载前电流 (约为额定连续电流的 50%) 会变成一个过载电流 (大约高于额定连续电流 10%),并且最终下降回到额定连续电流。

该温度表明了过载电流开始到结束的指数发热曲线。

当 GIL 环境温度较低时,过载所允许的温升更大一些。

如图 3.5.7 所示,额定的 GIL 最大温度允许额外超过 40℃ 环境温度的热量。

如果环境温度仅为 0℃，那么过载造成的额外温度就是 I^2R 计算出的总温度与 40℃ 之差。

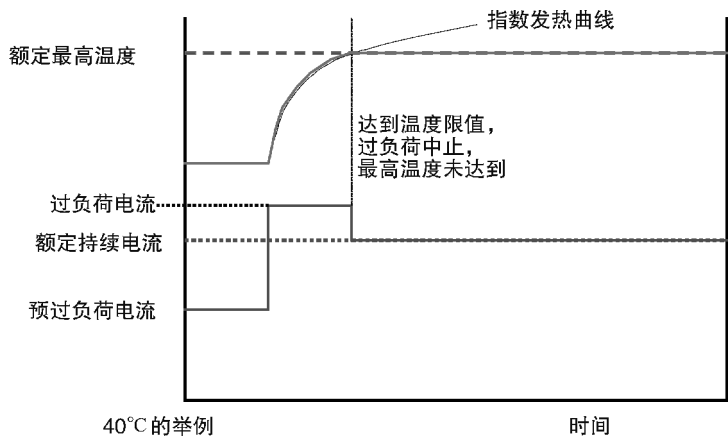


图 3.5.6 瞬时过载 (由 ILF 授权提供)

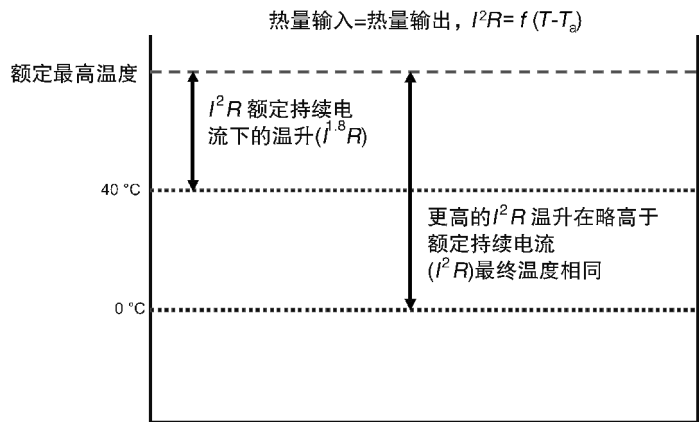


图 3.5.7 额定连续电流根据外界温度做出的调整 (由 ILF 授权提供)

3.6 规范检查表

GIL 的项目都是特殊的，规范检查表只能给出一些可能需要检查的信息框架。每个项目的当地条件都有不同，且要满足于非常不同的政府规则。一份详细的布线规划需要考虑所有成本影响因素，如河流、铁路、公路等障碍，土壤的类型，可进入性和景观条件^[221]。

布线规划

布线规划是一个具有多个交互步骤的优化过程，并且可能会有多套备选方案。首先，要考虑土壤条件和 GIL 直埋敷设、隧道敷设或沟渠敷设所需的宽度。公共住

房、生活区域、工业区域、街道、管道、运河等各种基础设施以及建设路径中需要确定的其他项目。尊重所有权十分重要，无论是公共所有权还是个人所有权，这对审批过程具有一定的影响。

土壤和地下设施规划数据的可用性：良好的数据将有助于防止意外，而糟糕的规划数据可能导致开凿期间遭遇障碍物，产生高昂的额外成本。施工期间路线的可进入性是一个重要的规划投入。最大运输长度和重量决定了装配过程，并直接影响项目总成本。一个简单的提示：GIL 部件的运输长度越长，现场焊接的数量越少，项目成本越低！

现场条件

GIL 为现场组装。这意味着 GIL 的单个部件要从预加工地点分别运输到现场装配地点。这要求现场具有建造装配帐篷来存储提前发运部件的条件，并且道路要允许卡车通行。这些预装地点需要接近 GIL 布线，并且需要分布在沿线几公里（见 3.3.12 节）。

技术数据

额定电压和电流是计算沿线的温度和按照标准确定试验电压的主要技术数据。气室的大小要结合布线规划和当地地下井道的长度限制（应该在 1 ~ 1.5km 范围内）来确定。见 3.7 节。

地下竖井

在沿线 1 ~ 1.5km 范围内，当 GIL 为直埋敷设时，隔离单元需要安装在地下竖井内。这些隔离单元安装在地下，必要时允许进入检查。可以设置监测设备。参见 3.7 节。

监测

为了对 GIL 进行监测，通过一条并行数据线连接每个地下竖井到管理与维护中心，并且需要设立一个控制中心。通常情况下通过数据光缆来完成。详见 3.3.13 条款。

工程研究

每条路线都需要进行工程设计，并且可能需要做以下的研究：

- 电网规划和模拟。
- 雷电过电压或操作引起的线路暂态电压。
- 保护 GIL 的避雷器。
- 通过电磁场计算出极限值。
- 必要时进行地震计算。
- 土壤和土地的研究。
- GIL 和二次回路的接地。

现场物流研究

- 运输长度和公路或铁路的可达性。

• 材料的存储——主要为外壳和导体较大（一般为 12 ~ 18m），需要较大的空间。

- GIL 预装配段的现场运输。
- 现场质量保险体系。
- 现场试验程序。

气室规范和识别

GIL 分为气体隔室或气体区域。重要的是 GIL 的运营商需要知道在什么位置设立气体隔间和形成气体分离区。

典型的 GIL 气体隔室为：

- GIL 直线单元长度达 1km。
- 隔离单元。
- 架空线路套管。

气密绝缘子应该在外部喷涂颜色或记号来标明。

气体区示意图应该给出全部输电线的概览，包括以下信息：

- 气体隔室。
- 用于充气 and 抽真空的阀。
- 用于控制信号的密度监视器。
- 第一密度报警级（通常低于充气密度 5% ~ 10%）。
- 第二报警级，GIL 即将到达最低气体密度。
- 控制中心显示的气体监测系统。

环境限制

- 线路周边。
- 公共审美。
- 土壤移动。
- 声音和噪声。
- 电磁场（EMF）。

标准和法规

- IEC 标准
 - IEC 62271 – 204 ‘GIL’^[54]
 - IEC 62271 – 1 ‘通用条款’^[82]
- IEEE 标准
 - IEEE 1677 ‘GIL 导则’^[129]
- CIGRE 报告
 - CIGRE TB 260 ‘N₂/SF₆ 混合气体’^[130]
 - CIGRE TB 218 ‘气体绝缘输电线路（GIL）’^[131]
 - CIGRE TB 351 ‘GIL 在长距离输电中的应用’^[132]

- 由当局发布的规定，通常因国家而异。

测试和检查

- 一般的装配检查。
- 控制系统功能试验。
- 现场高压和局部放电试验。
- 轨道焊接过程中的气密性检查。
- 控制系统功能试验。
- 电弧定位系统功能试验。
- 铭牌检查。

项目交付

- 包含所有地下竖井的路线规划。
- 接地规划。
- 气体监测和电弧定位系统控制示意图。
- 操作手册。
- 气体区域图。
- 物理图。
- GIL 的局部视图。
- 静态和动态负载规划。

当地特定需求

- 可靠性标准。
- 遵从当地政府管理。

3.7 敷设方式

3.7.1 概述

在本节中，介绍了 GIL 不同的安装或敷设方式。

大部分的敷设方式都已经根据不同应用的需要有了平行的发展。首先，GIL 安装在变电站内，并与变电站的高压部分相连。在这里，敷设方式有使用不同高度的钢结构的地上安装或混凝土沟渠敷设。在某些情况下，GIL 的敷设类似于管道的铺设，直接埋在土壤中，做了防腐蚀保护并用土壤覆盖。

在大型水坝水力发电站或当发电站位于山中的应用中，GIL 一般采用隧道敷设的方式。

在每种情况中，需要做出一定的机械和热力学要求，而且某种或其他敷设方式的优势需要做出评估。

GIL 是一种刚性金属管道，其物理特性是固定的。

机械刚体

GIL 是一种在长距离仅需少数支撑结构（例如 20 ~ 40m）的刚性管道。支撑结构的距离与决定管道机械刚度的管径和壁厚有关。

弹性弯曲

GIL 的铝管可以弯曲，且弯曲半径最小为 400m。大部分景观轮廓曲线可以按照该弯曲半径来规划。

转角单元

GIL 可以很容易地与转角单元相结合。这允许转折点做出任何角度的定向弯曲，甚至 90°，通常应用于地面架空安装。

这使大部分的应用成为可能。表 3. 7. 1 做出了一个概览。

表 3. 7. 1 GIL 的敷设方式

敷设方式	使用范围
地上敷设	在变电所或发电厂内
	使用 6m 及以上高度的钢结构
沟渠敷设	在变电所或在发电厂内
	使用混凝土沟渠与其他线路相交
隧道敷设	在水电站或大坝上
	在人口稠密的城市：电力隧道
直埋敷设	在变电所内或是乡村
	在不能架空敷设的地方使用地下传输
桥梁结合敷设	依附或嵌入桥梁
	GIL 的高安全性使其能与桥梁相结合
	在规划阶段就应该纳入考虑范围
交通隧道结合敷设	GIL 的高安全性使其能够加装在道路或铁路廊道内
	在规划阶段早期就应当纳入考虑范围
高速路结合敷设	加装在高速公路沿线或路面下
	因为 GIL 具有较低的电磁场和高安全性

GIL 应用于高压、大容量输电线有多种敷设方式。根据未来远距离传输、可再生能源的要求，GIL 为人口稠密地区 and 环境保护区域提供了新的可能性。

在下面，会更详细地解释不同的敷设方式。

3. 7. 2 地上敷设

3. 7. 2. 1 概述

今天，全球已安装的 300km 长的 GIL，大部分都架空安装在发电厂或变电站的钢架上（超过 50%）。例如在变电站内，通常需要跨越其他高压线路来使变电站的架空进线或架空出线与开关设备相连。当架空线路交叉时，高度明显增加，而且可能不会获得许可。

另外，在气体绝缘变电站里使用 GIS 时，有必要把 GIS 的相间距离扩大到 1 到

4~5m 来和架空线相连, 例如 400kV。在这种情况下经常使用 GIL。

或者, 在一些空气污染较为严重的国家, 会使用 GIL 来连接发电站的变压器和开关站 (如沙特阿拉伯或其他沙漠国家)。

铝外壳在大气条件下会氧化形成一个能防止腐蚀的氧化层。这简化了 GIL 的地面使用。这些地面架空敷设的高度可以比较低, 靠近地面, 也可以非常高, 以便变电站的卡车通行。

在某些情况下, 发电厂或变电所会根据特定的需求来选择两种敷设方式。

近地敷设

近地敷设所需的钢结构支撑最少。如图 3.7.1 所示照片右边的钢结构, 包括了固定在相同钢结构上的气体密度监测箱^[133,134]。

远地架空敷设

这种敷设方式的典型敷设高度是 5~8m。这样不会影响到 GIL 下方的交通运行且不受高电压要求的限制, 但是需要的钢结构支撑最多。GIL 与开关站的连接如图 3.7.2 所示。GIL 与架空线路的连接如图 3.7.3 所示。



图 3.7.1 近地架空敷设
(由阿尔斯通电网 授权提供)



图 3.7.2 利用高空远地钢结构连接开关站
(由 EGAT 和 Siemens AG 授权提供)

系统的交叉

当从装有 GIS 的开关站引出时, 为了穿过三相系统, 经常使用 GIL。该应用如图 3.7.4 所示。

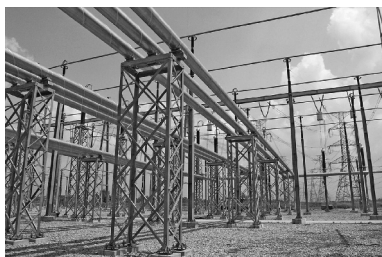


图 3.7.3 利用高空远地钢结构与架空线路相连接
(由 EGAT 和 Siemens AG 授权提供)



图 3.7.4 地面架空钢结构的焊接连接方式
(由 CGIT 系统授权提供)

用套管连接变压器要使用类似的钢结构。

3.7.2.2 腐蚀的防护

铝暴露在空气中时会发生氧气反应，产生一个仅有几纳米厚的氧化层，该氧化层具有较大的硬度且致密性好，不会产生进一步的腐蚀。铝具有自我保护的特性。只有当水长时间渗透（几周或几个月）时，该氧化层会与氯化物发生化学反应，进而发生溶解、腐蚀。为了防止腐蚀，在直埋敷设或隧道敷设时，需要采取一定的防护措施。

除非直接靠海（含盐的空气）或靠近淡化发电厂（盐在空气中），一般的雨水和雾气不会破坏氧化层。在全球大多数应用中不需要额外的防腐蚀措施，仅在某些情况下使用油漆或涂层。铝制外壳管的表面氧化层如图 3.7.5 所示。

3.7.2.3 机械应力

GIL 的刚性结构只需要几个钢结构来支撑，如图 3.7.6 所示。当敷设在钢结构上时，GIL 部分是在现场用接头连接。钢结构固定于混凝土基座。GIL 段是预制的，这些段的长度为 10 ~ 20m。



图 3.7.5 外壳的氧化层

（由 Alpiq Suisse SA 授权提供）



图 3.7.6 高空敷设钢结构的 GIL 部分连接

（由 Alstom Grid 授权提供）

3.7.2.4 热应力

地面设施暴露在空气和光照中。在寒冷的国家可能需要考虑冰雪荷载和风荷载。冰雪可能会增加钢结构的负重，风力可能会增加弯曲应力。

在炎热和光照强烈的国家，当电流一定时，需要考虑太阳热辐射给 GIL 增加的热量。参见 3.5.7 节载荷能力和过载。在热带和沙漠国家，可能需要对 GIL 进行遮罩处理。

在任何情况下，都需要考虑 GIL 管道的热膨胀。从输电关闭 GIL 冷态到热天 GIL 满负荷，热伸缩节要考虑热膨胀。对于一个 100m 长的段，温度增加或减少 40℃，热膨胀可能导致约 100mm 的长度变化。

纵向或转角热伸缩节是 GIL 地面安装的一部分。

3.7.2.5 GIL 地上敷设的评估

GIL 的地上安装方式主要应用于公众不可接近的变电站和发电厂。栅栏用于保护变电站或发电厂。地面安装较为容易，且能为高电压的连接提供最大灵活性。特别是在穿过架空线路的情况下，所以 GIL 常用于变电站或发电厂。因为 GIL 的接地

电位在外面，所以与现有的架空线或母线可以交叉。地面安装方便进入，可以随时进行目视检查。

3.7.3 沟渠敷设

3.7.3.1 概述

GIL 使用沟渠进行敷设的原因与地面架空敷设类似。因为在变电站和发电厂中架空敷设总是会发生交叉，所以地下敷设是一个更好的解决方案。

沟渠通常由混凝土建造，并且把 GIL 固定在小型的钢架上。混凝土沟渠的造价比地面架空设施更高，因为要进行挖掘，但比隧道敷设更便宜。沟渠用混凝土块覆盖。沟渠由一个具有三根 GIL 管道的三相系统构成（见图 3.7.7），或者可以容纳具有 6 根 GIL 管道的两个三相系统。



图 3.7.7 沟渠中的 GIL
(由 CGIT 系统授权提供)

3.7.3.2 腐蚀的防护

GIL 沟渠敷设的防腐蚀保护与地面架空敷设一样。沟渠中不能有水，以免铝质表面的氧化层被破坏。允许短时间存水（几天）。然后周围再次需要干燥。这通常是由疏干排水系统完成。

需要给予特别注意的是在恶劣环境大气条件下，例如在化工厂或海水淡化工厂。在任何情况下，首要解决方案是保持沟渠干燥。如果需要喷涂，那控制和维护就是必需的。如果在某些条件下沟渠难以保持干燥，那么就需要类似于直埋敷设所采取的防护措施。

3.7.3.3 机械应力

沟渠敷设的 GIL 的机械应力与地面安装机械应力类似。钢结构的距离都是一样的。没有额外的来自冰雪荷载或风荷载。

3.7.3.4 热应力

除了没有太阳辐射，沟渠敷设的 GIL 热应力与地面安装类似。

不同于地面安装的是，沟渠敷设没有风冷却，只有与环境空气产生热力对流。在任何情况下都需要对额定电流、槽内环境空气温度和热对流进行热计算。

3.7.3.5 评价

如果地面架空敷设的方案不能实施或是过于复杂，那么一般采取沟渠敷设的方式。对于沟渠敷设相较于地面安装的高成本需要最初决策。沟渠敷设允许（如地面敷设方案）变电站或发电厂内的交通运行。

在某些情况下，在变电站外也会使用沟渠敷设方式，为了防止公众接近需要遮盖沟渠。

3.7.4 隧道敷设

3.7.4.1 概述

隧道敷设方式是一种非常紧凑的敷设方法，通常 2.5m^2 的小空间需要容纳两个 GIL 系统。人员可以进入到隧道中，并且敷设 GIL 后仍能进入。这样便于控制和维修时进入。隧道可能在一个开放的沟渠中分段建造，然后用土壤覆盖（最小覆盖高度为 1m ）。隧道也可能进行深度挖掘，并通过竖井连接。挖掘隧道为圆形，直径为 $3\sim 4\text{m}$ ，可容纳两个 GIL 系统。

当直埋敷设不可行时，可以采用直径为 3m 的所谓的微型隧道这种经济的敷设方式——例如，在市区，横穿山脉，或者在海底连接岛屿。这种微型隧道通常为两点之间最短的连接，因此可以降低输电系统的成本。在调试后，系统容易进入。

隧道应保持通风，并且可以强制通风以增加冷却和电力传输的能力。通常不需要且应避免利用冷气来进行强制冷却，因为冷却系统的维护成本过高。防腐蚀保护和机械应力与地面敷设类似。

3.7.4.2 地面开挖式隧道

所谓地面开挖隧道就是沟渠顶部敞开，把隧道部件敷设在沟渠内，最后覆盖 $1\sim 2\text{m}$ 的土壤。隧道部分可以在现场利用混凝土建造，或者预制后在现场装配（参见图 3.7.8）。

在该种敷设方式施工完成后，会恢复周边景观。可以进行农业耕作。应避免种植大型植物，如树木，以保证隧道可以进入^[6,135]。

图 3.7.9 展示了位于 Geneva 机场的一段开放沟渠的隧道敷设视图。隧道两边分别用钢支架把双回 GIL 系统固定在隧道的墙上。在隧道中间留出了走道空间（约 0.8m 宽）。

这样的隧道可以建在人口稠密地区的街道和高速公路下面或是沿线。



图 3.7.8 地面开挖隧道敷设方式
(由 Siemens AG 授权提供)

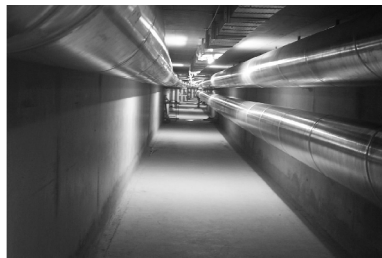


图 3.7.9 位于 PALEXPO 的单回 GIL 三相系统的隧道安装 (由 Alpiq Suisse SA 授权提供)

双回 GIL 系统所需的空間约为 2.5m^2 。这种隧道被认为是不可进入的，正常情况下不需要检查。只有在较长一段时间后，例如每个月，才需要对隧道进行目视检

查。同样，对于额定输电不需要进行额外的冷却——隧道内自然对流的空气足以把热量传递到周围隧道墙壁中并传入土壤。

对于 GIL 装配，如图 3.7.10 所示，GIL 将在隧道入口处进行焊接，然后再拖入隧道。通过弹性弯曲，连接后的 GIL 在支撑结构上滑动或滚动时将遵循隧道的曲率。照片中所示的弯曲半径约为 700m。

3.7.4.3 盾构开挖式隧道

盾构开挖隧道的发展使施工速度更快，精度更高。因其能降低成本，所以今天更多地建造盾构开挖隧道。GIL 被固定在隧道的墙壁上。可以在隧道内安装两个 GIL 系统，一边一个系统（如图 3.7.11 所示）。隧道中间的走道可以轻易通行。



图 3.7.10 GIL 在弯曲半径为 700m 的隧道中（由 Alpiq Suisse SA 授权提供）

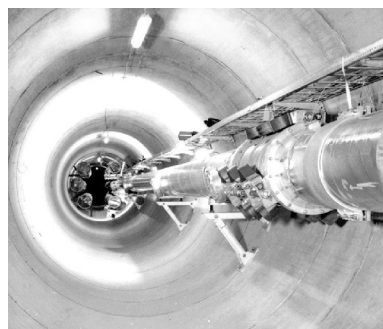


图 3.7.11 盾构开挖隧道内墙由混凝土段制成（由 Alpiq Suisse SA 授权提供）

隧道的直径为 3 ~ 4m，这取决于通道的空间需求。钢结构用来承载 GIL 的重量，并且在隧道形成曲线时提供导向，弯曲半径可以达到 400m。

为了在隧道内安装 GIL，把 12 ~ 14m 长的 GIL 部件焊接后通过竖井放进隧道中^[136]。支撑结构的距离可以为 20 ~ 40m。

盾构开挖隧道通常位于地下深处。最小深度是直径的 3 倍，一个直径为 3m 的隧道的最小的深度为 12m。在城市中深度可达 20m 或 30m。通过竖井可以进入隧道，如图 3.7.12 所示。利用起重机把 GIL 段经由竖井放入隧道，段的长度通常为 12 ~ 14m，取决于竖井的直径。竖井直径取决于建造隧道时使用的盾构机的类型。预制的 GIL 段由卡车运送到竖井（1）。起重机将 GIL 段放到接合点，在该点要设置焊接帐篷（2）。竖井间的距离有好几公里，GIL 部件经焊接后被放入隧道（3）。在 GIL 已经到达下一个竖井后，将通过竖井对该部分进行高压测试（4）。

在隧道中，GIL 被放置在滑块或滚筒上以允许运行期间热膨胀。滚筒由固定结构支撑，如图 3.7.13 所示。

在图 3.7.14 中，一组 6 根 GIL 段通过卡车运输到竖井。竖井被一个组装帐篷覆盖，以保护装配和焊接区域不受雨水和其他恶劣的环境条件影响^[100, 152]。

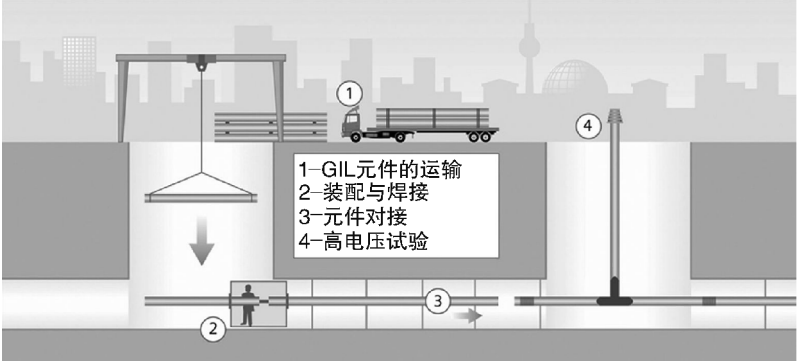


图 3. 7. 12 竖井隧道敷设（由 Siemes AG 授权提供）



图 3. 7. 13 支撑 GIL 的滚筒结构
（由 Siemens AG 授权提供）



图 3. 7. 14 装配区域一览
（由 Siemens AG 授权提供）

3. 7. 4. 4 腐蚀的防护

当把 GIL 敷设在隧道中时，外壳与环境空气作用形成一个氧化层。该氧化层很薄（只有几纳米），能够阻止腐蚀。不需要进一步使用涂层或采取被动防腐措施。只有当墙上持续滴落的水穿透外壳——包含氯化物——此时氧化层极有可能被破坏，并且腐蚀随之发生。所以隧道敷设的 GIL 需要采取一定措施，以防止持续性的水滴滴落，如加装一个防护罩。

3. 7. 4. 5 机械应力

隧道敷设的 GIL 的机械应力与地上安装类似。钢结构架在隧道墙壁上以支撑 GIL 的管道。隧道墙壁承受了来自于周围土壤和固定点的负载，所以需要协调隧道的机械稳定性。GIL 为轻质金属铝制成，并不会对隧道墙壁产生很大的应力，所以通常不会有问题。

隧道内的环境条件与地面不同。因为没有太阳热辐射，所以隧道内的湿度较

高；需要采取措施避免水滴凝结，排水系统要考虑避免水进入隧道。钢结构需要考虑在运行时 GIL 加热和冷却产生的热膨胀。

3.7.4.6 热应力

隧道敷设的热应力与地面安装类似。需要把传输电流产生的热量传导到隧道中，再通过自然或强制通风，通过竖井传导到外面，传导在隧道壁上，再经过热传导传递到周围的土壤中。在给定的输电容量下，每个应用都应进行热计算，以满足 GIL、隧道和周围土壤的温度限值。

3.7.4.7 评价

一方面，隧道敷设方式投资较为高昂，但是是一种隐蔽式的大容量紧凑型输电方式。隧道敷设的成本很大程度上取决于建造方式。从简单的靠近地面的隧道到防水深挖隧道成本的变化非常大。在项目规划阶段，要对每个方案进行研究来找到最佳解决方案。随着隧道建造的技术不断提升，其成本也逐渐下降。对于 GIL，隧道敷设方式非常方便，不需要防腐措施，且 GIL 是可以进入的。

3.7.5 直埋敷设

3.7.5.1 概述

除了隧道敷设方式，直埋敷设也是一种重要的地下输电方式。直埋敷设与石油或天然气管道铺设极其类似。这种铺设方法是一个开凿连续沟渠的过程，其目标是尽可能快地覆盖长距离。GIL 的直埋敷设遵循这种方法。

直埋敷设 GIL 是长距离输电的方式之一。在大容量（例如每个系统 3000MW）输送水平，输电距离在 100km 及以上，直埋敷设的 GIL 将成为一个“电管道”。GIL 直埋敷设的方法来自于石油和天然气管道铺设技术，其目标都是在短时间内安装长距离的管道。天然气管道运输是全世界公认的一种有效的能源长距离运输方式。在欧洲和北美，数千公里的天然气管道正在使用，没有技术问题，也没有公众不接受。其基本特征是一个平行于建设工地沿线的连续铺设过程^[137-139]。

管道通常用钢作为外壳管。管道经由电弧焊接后铺设到沟渠中。GIL 在铝管中用交流输电电压。连接处用电弧焊接。管道的机械力应当包括铺设时的机械应力和气压载荷，土壤负荷和运行期间的热应力。在这一节中会解释直埋敷设的 GIL 的正确尺寸。

GIL 直埋敷设方式是一种经济的解决方案，并为乡村输电线提供了一种迅捷的敷设方式。与管道铺设类似，GIL 需要连续铺设到一个明挖的沟渠中，附近应设有预装配地点以装备 GIL 部件。这样就能减少现场 GIL 单元的运输。因为 GIL 能够进行弯曲半径为 400m 的弹性弯曲，所以能够遵从地形的轮廓。

因为敷设在土壤中，GIL 是连续固定的，所以不需要额外的热膨胀补偿。GIL 的四种标准单元使现场安装非常经济，并且短时间内就能铺设较长距离。

在外壳管上喷涂聚合物涂层来进行防腐保护。涂层技术来自于拥有丰富经验

的天然气和石油管道铺设。同时,转角单元也会涂一层防腐蚀涂层。现场轨道焊接的 GIL 段的连接处会使用一种特殊的现场涂层来保护焊点。

直埋敷设方式在乡村开放地形中的运用是典型的。这可能与现有的管道路线、公路、铁路或开放的农田有关。安装后,至少回填 1m 厚的土壤,上面的土地依然可以进行农业耕作。

GIL 的直埋敷设是不可见的,仅在每 1 ~ 1.5km 的地方设置地下竖井以便进入。因此,只需要一个人孔。一旦安装完毕,不需要运行或维护进入。

架空敷设的方式越来越遭到公众的反对,在住宅、风景保护区或国家公园附近建立新的架空线几乎是不可能的。审批过程可能需要数十年才能与公众达成一致。对于可再生能源发电所要求的输电网重组需要在短时间内建设新的大容量输电线。GIL 直埋敷设是一个可行的解决方案。

3.7.5.2 敷设过程

类似于管道铺设,把 GIL 连续敷设到敞开的沟渠中,并且在附近设立预装配点以减少 GIL 单元的运输。因其拥有可弹性弯曲的金属外壳,GIL 可以灵活地适应地形的轮廓。具体地说,不同的地形需要不同的技术方案。

在土壤中,GIL 是连续固定的,所以不需要额外的补偿元件。GIL 的直埋敷设过程如图 3.7.14 所示^[34,36,78,102]。

施工过程如图 3.7.15 所示。单个 12 ~ 14m 长的 GIL 单元在移动预加工帐篷中进行预加工 (1),帐篷要设立在接近铺设的地方。在设立在沟渠处或沟渠内的焊接帐篷内 (2),通过焊接把 GIL 单元连接起来。100m 甚至更长的段敷设到沟渠前要在沟渠附近完成连接。另一个敷设方法是利用隔离竖井 (4) 来定位焊接帐篷,并把 GIL 段放入敞开的沟渠中。这种敷设方法结合了隧道敷设的放入方法和地面沟渠直接放入土壤。

焊接将在沟渠内的焊接帐篷中完成 (3)。1000 ~ 1500m 的段将在隔离竖井定位前连接 (4),以便能进行直埋敷设并固定分隔 GIL 气室的隔离单元。隔离竖井由混凝土建造。

图 3.7.16 显示了如何将一段 GIL 敷设到沟渠中。

在 GIL 经过连接、焊接和防腐蚀处理后,要开始回填沟渠。基本上,要把挖出的土壤全部回填。只有在某些热环境下和 GIL 为直埋敷设时要使用特殊的回填材料以增加导热性。GIL 通过覆盖土壤的自重形成的摩擦力固定在地面。混凝土地下竖井可用于高压测试和检测设备温度、气体压力或局部放电测量。

隔离单元置于地下竖井中。气体密度监测和电弧定位等二次回路系统也安放在竖井中^[102]。

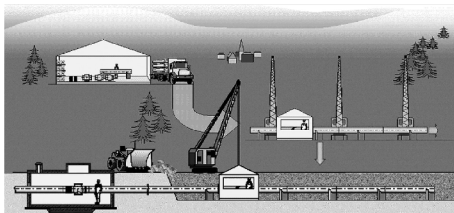


图 3.7.15 GIL 直埋敷设的施工过程
(由 Siemens AG 授权提供)

通过起重机把 GIL 部件靠近沟渠，然后敷设到沟渠中。沟渠应预先去除石子，在敷设完成后，利用回填材料把沟渠封闭。把 GIL 敷设到沟渠的情形如图 3.7.17a 所示，而图 3.7.17b 显示了管的弯曲和沟渠的回填^[79]。



图 3.7.16 把 GIL 敷设到沟渠中
(由 Siemens AG 授权提供)

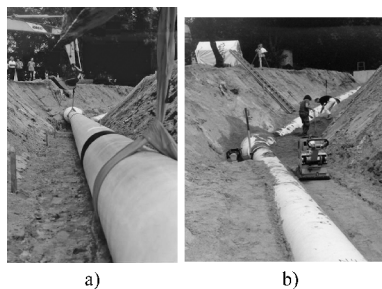


图 3.7.17 把 GIL 敷设到土壤中：
a) 由起重机敷设；b) 回填
(由 Siemens AG 授权提供)

对于单相 GIL，沟渠大概要挖 2 ~ 2.5m 深，以便最小回填厚度为 1m。竖井沿输电线路大约 1km 距离。竖井由混凝土建造，并且用来支持分隔气室的隔离单元。气体密度传感器和用于局部放电测量和电弧定位系统的超高频传感器也和隔离单元相连接。这些地下混凝土结构必须融入到地形当中。

图 3.7.18 显示了两个三相 GIL 系统敷设时两相敷设的情形。沟渠一旦打开，就允许大型机械进行挖掘，并且允许平行敷设单回 GIL 线路。最后，完成的沟渠会立即通过回填进行封闭。

对于改变方向，直埋时会使用转角单元。直埋的转角单元由铸铝制造，可以制成任何角度。30°的转角单元如图 3.7.19 所示。转角单元需要考虑来自管道的热膨胀力并把这些力转移给周围的土壤。



图 3.7.18 双回 GIL 系统的直埋沟渠

位于两个竖井 (1) 之间的一段 GIL 如图 3.7.20 所示。地下竖井内放置了隔离单元和补偿单元 (2)。竖井间的距离为 1 ~ 1.5km。每相代表了一个气室。在图片的中间还显示了一个直埋转角单元 (3) 作为示例。转角单元固定在土壤中，成为气室的一部分^[141]。

上图显示了三个单相 GIL 组成的一个三相电气系统。GIL 外壳之间的距离在

0.5~0.8m 之间，取决于热力学需求或修理的可接近性。在外壳管直径 0.5m 情况下，三相 GIL 的总宽度为 2.5~3.2m——包括 GIL 以外的空间要求——输送 2000MVA 的一个三相直埋 GIL 的总宽度为 4.5~5m。

沟渠的要求与对 GIL 的热力学和机械影响有关。需要根据从 GIL 外壳到周围土壤中的热传导来确定回填材料的导热系数。回填材料一般为砂和粘土的混合物，有利于保持土壤中的水分以便获得良好的热传导系数。土壤的物理热传导系数是已知的。在机械方面，回填土壤内不应含有石子或岩石，以免损坏 GIL 外壳及其被动防腐保护。通常，可以直接使用回填材料进行回填，只需进行一些必要的过滤石子和岩石的工作。在某些情况下，为了提高导热系数，可以添加一些特殊材料。在非常罕见的情况下，如纯岩石，所有挖掘出来的材料应用适当的回填材料替换。

可以预期的是在某些情况下土壤钻孔可能会损害掩埋的 GIL，所以有必要覆盖管道。足够的土壤覆盖通常能防止外部损伤，如农业耕作。加装混凝土盖板也可以防止钻井或挖掘的损害。应当避免在 GIL 上方种植根部较大的大型树木^[79]。



图 3.7.19 30°的直埋转角单元
(由 Siemens AG 授权提供)

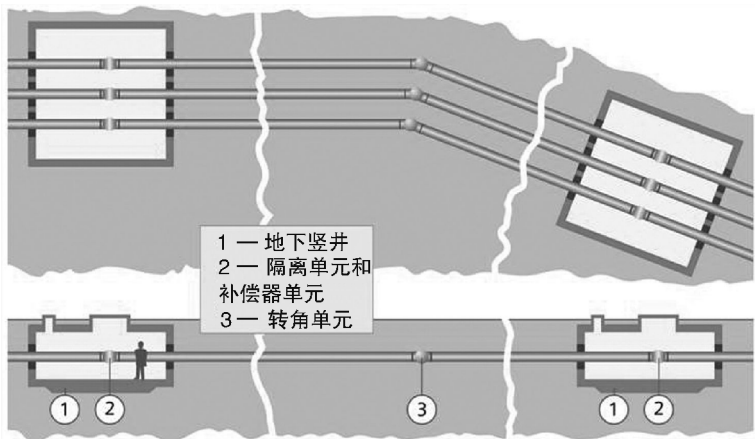


图 3.7.20 三相 GIL 系统，顶部及侧面视图（由 Siemens AG 授权提供）

掩埋的 GIL 横截面如图 3.7.21 所示。基本上，GIL 周边主要包括三大区域。首先是基层材料不应含有较大的石块，第二回填材料通常是挖出来的土壤，然后在一定距离为自然土壤。

该侧视图显示了隔离单元的竖井，包括控制和监测设备（气体密度传感器、局放传感器和电弧定位传感器）。竖井是可以进入的，其内部高约 2m。长度或为

5m, 宽度或为 6m。竖井可以在入口人孔处放置一块板来完成封闭。

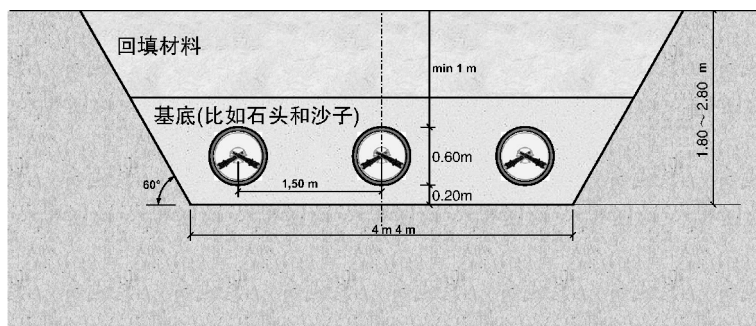


图 3.7.21 直埋 GIL 的横截视图 (由 Siemens AG 授权提供)

3.7.5.3 腐蚀的防护

3.7.5.3.1 概述

对于直埋 GIL, 防腐蚀保护至关重要。土壤中的水和矿物质会破坏铝外壳的氧化层然后侵蚀外壳。有两种防腐蚀系统可以利用。被动防腐蚀保护是指喷涂一层聚乙烯或聚丙烯包括从铝中排除氧的防腐蚀保护层。这种被动防腐蚀措施成功地运用于管道, 并且能够提供长期的保护。此外, 可以采用电势牺牲电极来保护铝管这种主动的防腐蚀保护。这种主动防腐蚀措施可以在后期应用到 GIL 上^[106,107,141]。

3.7.5.3.2 被动防腐蚀

被动防腐蚀是指喷涂一层 3 ~ 5mm 的聚乙烯 (PE) 或聚丙烯 (PP) 材料。见 3.3.11 节。

GIL 外壳涂层的制作与管道一样。利用酸性液体/或砂纸清理管道表面, 然后把涂层喷涂到管道上或是利用胶带把 PE 或 PP 涂料缠绕在管道上。

可以使用伸缩管材或喷涂的方法来保护连接处的焊点。外壳的防腐蚀保护涂层如图 3.7.22 所示。

3.7.5.3.3 主动防腐蚀保护

除了被动防腐蚀保护外, 也可以加上主动防腐蚀保护系统。主动防腐蚀保护系统在被动保护并且电气绝缘的外壳管上添加了一个电压电势, 这样就可以通过牺牲电极的方法来保护铝外壳。电压大小与材料有关, 在 GIL 上运用时, 为 1 ~ 1.2V。

主动防腐蚀保护系统的一种方法是利用一个二极管桥接来产生 1.2V 的保护电压 (两倍于单个二极管 0.6V 的门电压)。牺牲电极一般由铁或石墨制成, 埋在土壤中的深度最低为 0.8m。二极管桥的负极与埋在地下的 GIL 相连 (见图 3.7.23)。

3.7.5.4 机械应力

3.7.5.4.1 概述

直埋 GIL 的机械压力来自于铺设在管道上的土壤的自重。土壤相对较重, 每 m^3 的土壤重量超过 1000kg。

此外, 在交通情况下还需要加上车辆的重量, 这来自车轮载荷并取决于交通工

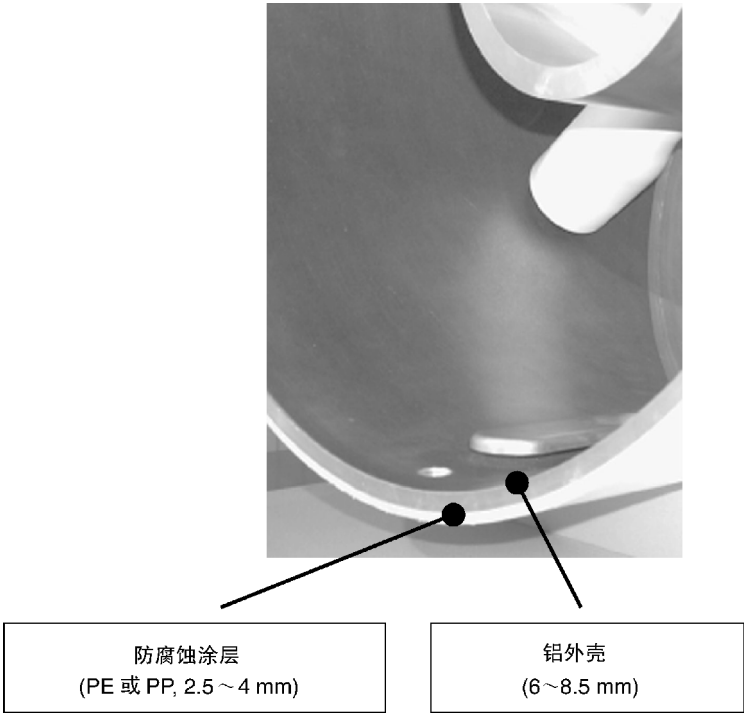


图 3.7.22 外壳的防腐蚀涂层（由 Siemens AG 授权提供）

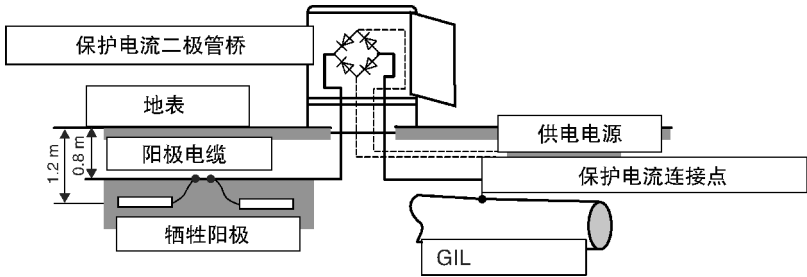


图 3.7.23 利用二极管桥接的主动防腐蚀保护（由 Siemens AG 授权提供）

具的类型（如汽车或卡车）。这些力作为径向力作用在外壳管上。

热力来自于外壳吸收的热量和绝对温度与周围土壤产生的摩擦力，使管道不能移动。这些热力很高，温度上升 40℃ 会产生 180t 的力。

用无石的基层材料把 GIL 管道敷设在沟渠中，如图 3.7.19 所示。在照片的前面和后面，可以看到直线段以 400m 为半径在弯曲。照片中间显示了一个即将被掩埋的转角单元。

3.7.5.4.2 径向应力

横断面上的应力包括了土壤载荷、交通载荷和气压载荷。用 ATV - A127 标准来分析计算^[52,93]。

计算是在二维和三维模型上进行的^[78]。

按照 ATV 规则的计算模型反映了 GIL 的敷设方法和回填土壤类型。最糟糕的情况是在垂直竖井壁上，其应力最高（为 26.2MN/m^2 ）。该模型把最高值作为安全阈值。垂直方向的变形为 -3.3mm ，水平方向变形为 2.9mm 。在此基础上，选择的应力要高于实际应力，以提供安全裕度。这在下面的有限元（FE）计算中有所体现。

有限元计算在 GIL 的二维和三维模型上进行。在该模型中，把土壤和外壳划分成 $8 \sim 20$ 个节点网格元素。模型中存在的一个问题是对当前土壤刚度和变形能力的定义。这对计算结果和实际敷设条件有很大的影响。根据 ATV 标准的建议，外壳下部的刚度要比上部的刚度大 10 倍^[93]。

GIL 的横截面应力取决于管材和壁厚，需要低于标准中规定的最大许用应力。当只考虑土壤和交通载荷时，最大应力值远低于许用应力。计算的值代表了外壳管外的张力和外壳管内的压力。外壳管内部的应力高于外部应力。

表 3.7.2 列出了土壤、交通和气体压力的荷载。应力值都低于限值 83.33MN/m^2 。土壤、交通和气压载荷叠加产生的最大应力计算得：

土壤和交通载荷应力： $\sigma_{\text{VM}} = 19.3\text{MN/m}^2$

气压载荷应力： $\sigma_{\text{VM}} = 27.5\text{MN/m}^2$

产生的压力： $\sigma_{\text{VM}} = 46.8\text{MN/m}^2$

许用应力 $\sigma_{\text{zul}} = 83.3\text{MN/m}^2$ ，安全系数为 1.5。根据这些分析，GIL 外壳可以承受来自于土壤、交通和气体压力载荷的应力。

表 3.7.2 土壤、交通和气压载荷

	$\sigma_{\text{VM}} / (\text{MN/m}^2)$	
	2D	3D
顶部	28	28
中部	22	28
底部	28	28

3.7.5.4.3 纵向应力

GIL 模型尺寸如下：

- 纵向（ x 轴）：2400m
- 横向（ z 轴）：500m
- 高度差（ y 轴）：20m

垂直和水平的比值（ $20\text{m}/2400\text{m}$ ）小于 1%，可以忽略。海拔差异的影响太小，可以不用包括在模型中。

建立了一个二维模型来计算 GIL 所受土壤、交通载荷、气体压力载荷和热载荷的影响。假定 GIL 覆盖的土壤厚度为 2m，建立的模型如图 3.7.24 所示。对以下两种敷设方式进行了研究：

- GIL 外壳管的端部刚性固定；

- GIL 外壳管端部自由运动。

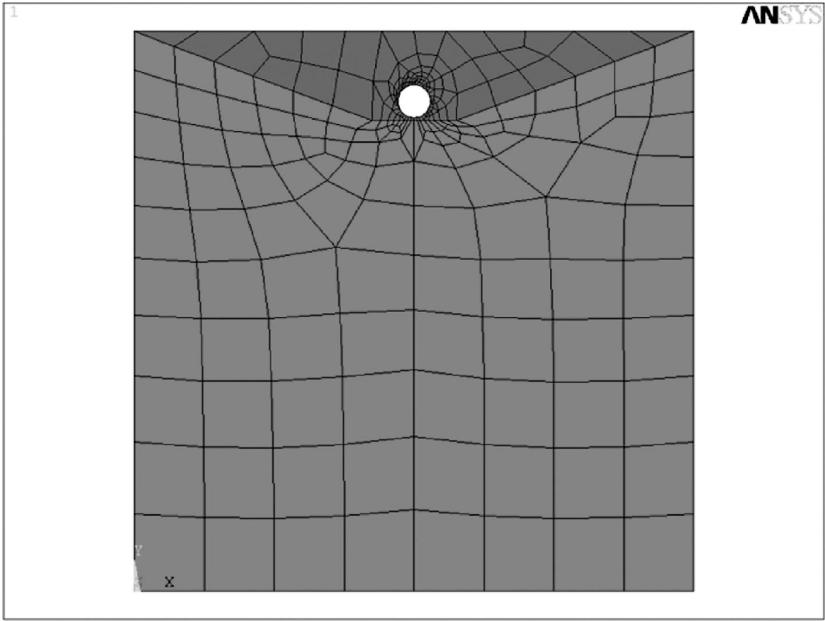


图 3.7.24 力学计算模型（由 Siemens AG 授权提供）

来自街道或铁路的交通载荷需要添加到气体压力载荷、温度载荷、土壤载荷和 GIL 的自身重量中。因为不同的位置交通载荷不同，所以要分别计算街道或铁路的载荷，见表 3.7.3。

表 3.7.3 交通载荷

载荷形式	$\sigma_{VM}/(MN/m^2)$						
	道路交通	铁道交通	内部压力	温度	自重 + 土壤载荷	总载荷(无交通载荷)	总载荷(包含交通载荷)
管道	2.5	6.4	23.7	65.8	0.05	73.9	78.5

载荷的应力 σ_{VM} 不同——从土壤载荷的 $0.05MN/m^2$ 到热载荷 $65.8MN/m^2$ 。气体压力和温度的负载有相反的向量。

外壳管端部自由运动

对两种模型进行了研究。

案例 1：以相同的位移把管道理想地敷设到土壤中

表 3.7.4 交通、气压、温度、自重和土壤载荷

载荷形式	$\sigma_{VM}/(MN/m^2)$						
	道路交通	铁道交通	内部压力	温度	自重 + 土壤载荷	总载荷(无交通载荷)	总载荷(包含交通载荷)
管道	2.5	6.4	23.3	20.9	0.4	32.0	37.6

把表 3.7.4 中所示的不同负载的绝对值叠加,以得到总负载。

x 轴上的位移

对于一个 20m 长的管道的膨胀:

$$\varepsilon = \Delta l / l = \alpha_T \Delta T \rightarrow \Delta l = (2.35 \times 10^{-5}) ^\circ\text{C}^{-1} \times 40^\circ\text{C} \times 20\text{m} = 1.88 \times 10^{-2}\text{m}$$

有限元计算得到水平位移为 1.4cm,是外壳自由端分析计算结果的 75%。

管道与土壤间的摩擦力

土壤和外壳之间的连接由管道对土壤的摩擦力决定。因此,可以发现管道与土壤间的相对位移。对于一个 20m 长的管道,其水平位移是 1.66cm,为分析计算结果的 88%。为了计算出管道和土壤间的摩擦力,还需要确定以下值:摩擦系数和管道和土壤之间的接触刚度。这些值只能做出大致的估计。这种敷设方式产生的应力较低。

GIL 的弯曲

与 20m 的垂直位移不同,不能忽略横截面上 500m 的落差。为了估计这个影响开发了平板模型,模型中 GIL 外壳段固定在土壤中。模型长 400m,弯曲半径为 500m。每一段都加入一个转角单元。对于横截面上应力的计算,只需考虑气体压力和温度的影响,因为其他压力都在垂直方向上。

无论是对于固定管道还是可移动管道, y 轴方向上的弯曲对 x 轴和 z 轴的没有影响。

$x-z$ 面上气体压力和温度产生的载荷,当 GIL 外壳固定时为 73.3MN/m^2 ,当外壳端部可移动时为 73.0MN/m^2 。这表明截面的应力不会使自由端应力减小,因为外壳完全掩埋在土壤中。

转角单元计算

由于在 GIL 转角单元中存在热膨胀和气体压力,所以转角在垂直方向上对管道有一定作用力。因此,在转角区域需要在土壤中承受更高的弯曲应力。为了增加转角区域的每一米 GIL 管道的土壤容量,转角单元在中间由两根薄壁高强度的球形管道组成。在 GIL 直管的两端连接上转角单元。

转角的载荷由内部气体压力、空气热膨胀力(通常是 1.2MN)和厚达 2m 的回填土壤载荷组成。转角要承受对称轴向载荷。对于该模型,该管道的弧形部分和周围土壤被划分为 63 个元素,并且每个体积元由 4 个节点相连。土壤模拟为弹性物质。

以转角的载荷情况为例。实际应用中,任何能影响运行条件的土壤、环境和导体温度都需要模拟来排除过载的情况。对于该计算,转角和土壤间具有一定的摩擦。这意味着管道和土壤是固定耦合的。

本例中所选择的严苛的条件并没有在管道和转角曲面间形成过载。要计算造成材料塑性变形的最大应力,需要选择一个非线性模型来模拟转角的变形。该计算模型并未考虑实际情况中土壤中管道的摩擦力,因此,在实际应用中该力会减小。

结论

轴向方向的应力分析表明，温度和压力应力占主导地位。土壤压力、自重、交通载荷对 GIL 的最大总应力为 78.5MN/m^2 ，小于许用应力 83.33MN/m^2 。转角单元需要额外计算 GIL 垂直方向上的应力。

此外还有弯曲半径 400m 的弹性弯曲载荷，该载荷较小，在计算中可以忽略不计。

3.7.5.5 移动

3.7.5.5.1 外壳管的移动

管道上的应力与管道的移动密切相关。没有任何移动会导致应力最大。当管道发生移动时，应力会减小。对固定管道进行计算导致高压。管道的移动与管道表面与周围土壤的摩擦有关。

在一根长 50m 的 GIL 段上对其外壳的移动进行了测量。图 3.7.25 显示了 GIL（上面的线）的移动与电流的关系（下面的线），该电流能使 GIL 温度上升。

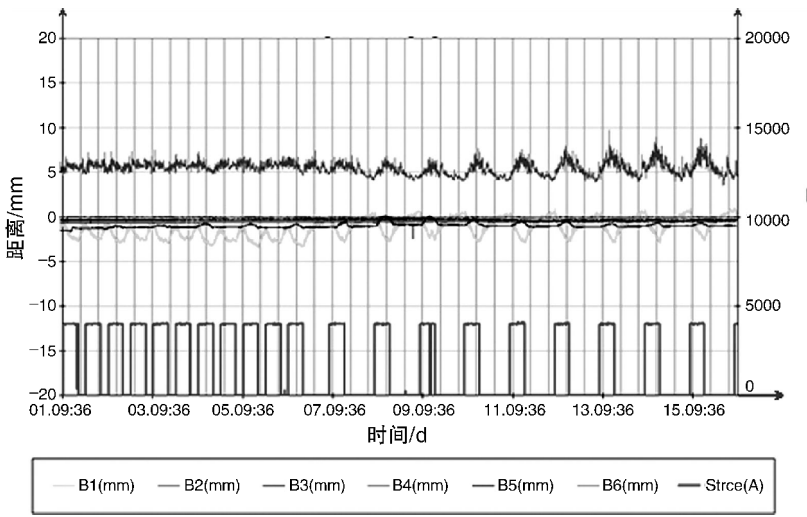


图 3.7.25 外壳管的移动（上面的线）与电流的关系（由 Siemens AG 授权提供）

在 GIL 管道上不同的测试点上（Pt2, 3, 4, 5），移动仅有 0.5mm 甚至更少，如表 3.7.5 所示。

表 3.7.5 土壤中 GIL 管道的移动

	移动/mm	净距离/mm
Pt2	-0.6/ -0.4	0.2
Pt3	-0.5/ -0.3	0.2
Pt4	-0.1/ 0	0.1
Pt5	-1.1/ -0.6	0.5

很明显，土壤中管道的静摩擦起到了重要作用，减少了管道 62% 的膨胀。为比较直埋 GIL 的长期试验的理论计算结果，用有限元法的计算忽略了管道和土壤间的摩擦并包括 40℃ 温差。

3.7.5.6 热应力

直埋 GIL 管道的热应力与导体内电流和传递到土壤中的热量有关。因为周围土壤环境是变化的，所以需要每个 GIL 项目进行热力学设计，这是工程研究的基础。从导体到外壳的内部热传递通过绝缘气体的对流来实现，温差大约稳定在 10℃ 左右。土壤导热性不同，取决于土壤混合物以及水和湿度。

在 3.2.16 节中解释了 GIL 的热力学设计理论。

GIL 的低电阻导致运行期间发热量低。当直埋敷设时，温度限制由不可逆转的土壤干化决定，土壤干化需要最大 30℃ 以下的长期温升。热传导和土壤的导热性在热分布中起重要作用。因为 GIL 周边分布了大量的土壤，某些日子出现较大容量的输电和过载电流是可以接受的。所以要对导体最大内部温度（120℃）和绝缘子温度（105℃）做出限制。

GIL 和它周围的土壤形成一个热力耦合系统，内部热量由导体和外壳内的循环电流产生。导体和外壳通过对流和热辐射散热，而导体和外壳间隙中气体的热传导可以忽略。外壳产生的热量主要通过径向传递到土壤中，最终传递到土壤表面。最后通过环境空气的对流把产生的热量吸收^[142]。

3.7.6 定向钻孔

定向钻孔，也叫做微型隧道，通常用于绕过如街道、河流和铁路等障碍，在 GIL 的建设中不能重新确定路线。这种微型隧道的典型长度一般为几百米，有些能长达 1km。微型隧道的直径在 0.5 ~ 1.0m 之间，可以容纳单相电缆或 GIL 系统^[118]。

图 3.7.26 显示了水平钻孔的原则。这种情况是在海底或湖泊水下的应用。从右边用钻孔机械开孔，从左边插入 GIL。

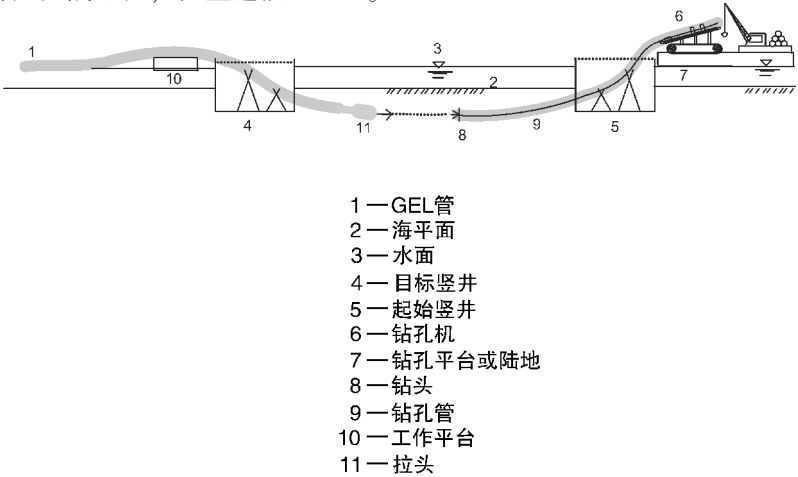


图 3.7.26 定向钻孔的原则（由 Siemens AG 授权提供）

在陆地平台上 (7) 的钻孔器械 (6) 在起始竖井 (5) 开始钻孔。钻头 (8) 朝向目标竖井 (4)。一旦完成钻孔, 通常用 PE 或 PP 钻孔管 (9) 塞入来保证孔的安全。通过这个钻孔管拉入 GIL。

当钻孔直径为 0.5m 时, 该钻孔可以容纳直径为 0.5m 的单回 GIL 管道。要把三个单回 GIL 管道放入需要钻孔直径为 1.8m。

3.8 长期试验

3.8.1 概述

第二代 GIL 经受了由电流和高压试验电压所带来的联合应力的长期试验。试验电流和电压高于额定值, 在加速老化的条件下验证了 GIL 的寿命。在德国柏林的 IPH 试验室, 通过与德国主要的输电运营商合作, 对隧道敷设和直埋式 GIL 进行了长期试验。

采用 N_2/SF_6 混合气体及全焊接设计的 GIL 是一种新技术, 已经通过了长期试验。长期试验证明 GIL 可以敷设在实际现场条件, 在 50 年预期寿命中能可靠运行。

用于长期试验的 GIL 安装在隧道中, 或者直埋两个不同的试验装置。在长期试验时只需安装一相 GIL, 因为其他两相的性能相同。所选择的安装长度保证了所有功能单元都能被安装和试验到。

长期试验还包括了对现场维修程序的验证。在实际的现场敷设条件下更换需要维修的 GIL 段验证了维修程序和维修时间。即使根据过去 35 年来 GIL 运行的经验, 这种故障很少发生, 但是维修程序仍然是需要的。

隧道敷设的 GIL 试验装置长约 70m, 安装在 IPH 试验场的混凝土隧道中。在实际的现场敷设条件下, 计算机控制的轨道焊接技术用于验证其可行性。预装 GIL 段的全部现场装配过程、GIL 段的连接、拉进隧道、高电压老练、以及模拟 50 年寿命的试运行过程都应用于这段 GIL 试验装置。

直埋的气体绝缘输电线约为 100m 长, 直接埋在 IPH 试验场的沟渠内。长期试验装置包括所有形式的 GIL 单元, 在现场进行了预组装, 掩埋前敷设在沟渠中。沟渠内外基于实际条件的外部工作证明自动焊接工艺以及现场高电压试验都是可行的。最后, 长期试验证明 GIL 可以实现 50 年的模拟寿命。

敷设在隧道或直埋的用 N_2/SF_6 混合气体的 GIL 长期试验成功地完成全部试验程序。试验结果、试验装置以及测量方法都进行了解释^[38, 102, 141, 143~145]。

总的来说, 长期试验的试验结果表明用 N_2/SF_6 混合气体的 GIL 是能够从架空线直接把大容量电力引入地下三相系统的可靠的技术。同时证明额定值达 2000 ~ 3000MVA 大容量三相输电系统可以以可靠的、经济的、生态的方式建设。

未包括在 N_2/SF_6 试验装置的有其他形式的开关元件, 如断路器、隔离开关和接

地开关。这些开关元件被认为是 GIS，使用 100% 的 SF₆，长期试验装置配置了一些测量元件来测量温度、位移、机械力、电流和电压。对测量结果进行了解释^[146]。

3.8.2 隧道敷设

3.8.2.1 隧道中的试验装置

与德国主要的输电运营商合作，在柏林的 IPH 试验室建造了一个模拟实际的试验装置，对隧道 GIL 进行验证。试验装置包括 GIL 所有必须的部件，并通过 GIS 部件与高压试验装置连接。

长期试验的电压和电流

长期试验时间为 2500h，代表 GIL50 年的寿命期，通过施加提高的电压实现加速电气老化。机械老化则由电流使导体和壳体的温度上升，然后再使导体和壳体冷却，这样把机械膨胀产生的力传递到 GIL 系统上，导体在滑动触头中移动或者壳体向伸缩节移动。

试验包括依次进行的大电流试验和高电压试验，以模拟 GIL 加热和冷却的顺序。一个加热过程为 5h，电流为 3200A，以达到设备的最高温度 60℃（额定电流为 2200A）。冷却时间为 7h，使导体和外壳管冷却到隧道中的环境温度约 25℃。

在冷却过程中，480kV 的相对地电压（额定值的 2 倍）被施加到 GIL 上（额定相对地电压 240kV），并且每隔 480h，施加一次 1050kV 的操作冲击电压。

长期试验循环

模拟 50 年寿命的长期试验的时间长度为 2500h。整个试验分为 5 个循环，每个循环 480h，余下的试验循环为 96h。如图 3.8.1 所示。

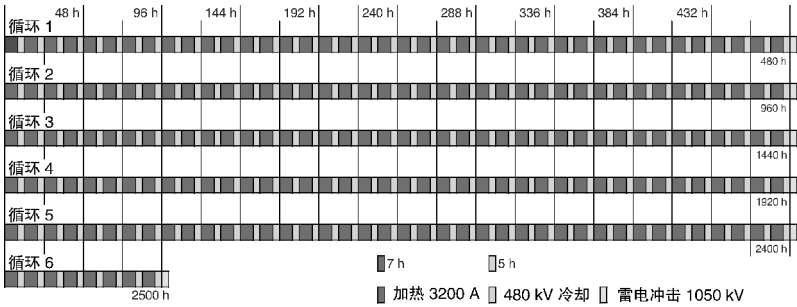


图 3.8.1 长期试验的加热和冷却周期以及雷电冲击试验

每个试验循环分成若干段，每段 12h，其中 5h 为 3200A 下的加热，7h 冷却，无电流，电压为 480kV。480kV 相对地电压为额定电压的两倍，意味着 2500h 模拟 50 年寿命。这些段每隔 480h 或 20 天重复进行一次。在每次 480h 结束的时候，向 GIL 施加 1050kV 操作冲击电压，以模拟雷电或者电网的操作冲击^[38,147]。

GIL 功能单元

长期试验的试验装置包括建造长距离 GIL 所有必须的部件，如：

- 直线单元；
- 转角单元；
- 隔离单元；
- 补偿单元。

长期试验的试验装置如图 3.8.2 所示，试验值见表 3.8.1^[6,36]。

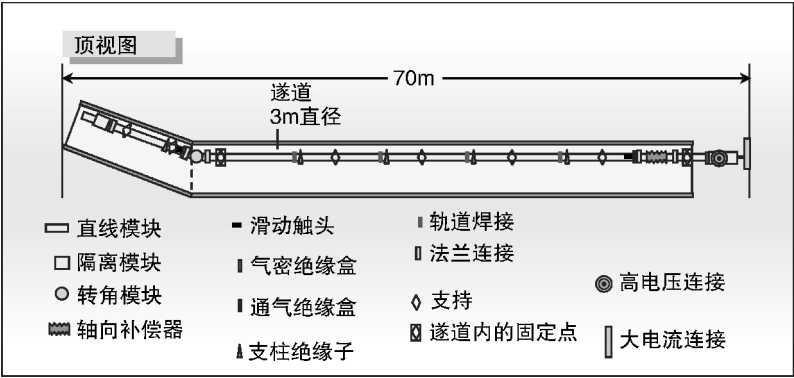


图 3.8.2 隧道敷设 GIL 长期试验装置

图 3.8.2 中是 70m 长的 GIL 长期试验的试验装置，安装在隧道中。隧道分成几段，每段的直径为 3m，长度为 4m，敷设在地面上并连接在一起。

直线单元是用于满足距离要求的主要部件。为了满足弯曲的路径可实现弹性弯曲。弯曲半径可以小到 400m。直线单元的典型长度为 12 ~ 18m，因此这里采用 12m 长的管。直线单元由自动轨道焊机焊接而成。

转角单元用于弯曲半径小于 400m 或者方向必须改变的地方。这通常在 GIL 的端部，当需要连接架空线或者沿着线路的时候。长期试验装置在左端有一个 20°的转角单元。

表 3.8.1 隧道敷设的 GIL 长期试验参数^[6]

试验类型	应力负荷	单位	数值
初始试验（调试）	试验电压：		
	额定短时交流耐受电压	U_d	630kV，含局放监测
	操作冲击电压	U_s	1050kV
	雷电冲击电压	U_p	1300kV
维修前的长期试验顺序 从 0 ~ 960h	5h 电流	I	3200A
	7h 交流试验电压	U	480kV（2.0pu，含局放监测）
	每 480h：		
	操作冲击电压	U_s	1050kV
模拟维修后中间试验（重新 调试）	试验电压		
	额定短时交流耐受电压	U_d	630kV，含局放监测
	操作冲击电压	U_s	1050kV
	雷电冲击电压	U_p	1300kV

(续)

试验类型	应力负荷	单位	数值
在维修后的长期试验顺序 从 960 ~ 2500h	5h 电流	I	3200A
	7h 交流试验电压 每 480h	U	480kV (2.0pu, 含局放监测)
	操作冲击电压	U_s	1050kV
2500h 后最终试验	试验电压		
	额定短时交流耐受电压	U_d	630kV, 含局放监测
	操作冲击电压	U_s	1050kV
	雷电冲击电压	U_p	1300kV

隔离单元安装在长期试验装置的两端，通过气密绝缘盆形成一个气室。在实际应用中，气室长度可达 1 ~ 1.5km。

补偿单元吸收 GIL 壳体在轴向上的热膨胀，装在长期试验装置的右端，在隔离单元之前。第二个补偿单元装在靠近试验装置左端的转角单元处。

在混凝土隧道中，长期试验装置通过钢支架固定在混凝土壁上。每隔 24m 装一个钢支架，带有滑块或滚轮，在热膨胀的影响下能够运动。隧道在 IPH 试验场的地面装好，如图 3.8.3 所示。混凝土隧道每段长 4m，内部直径为 3m。长期试验装置有一段 50m 长的段，然后装 20°转角，另一段长 20m，使得总长度达 70m。这种隧道通常埋在地下，深度至少为 10m，在城市下面盾构挖掘的隧道中深度可达 40m^[36]。

在图 3.8.4 中，隧道中装有两个三相的 GIL 系统，总共有 6 根外壳管，用以模拟隧道中的实际空间。这种完整的隧道安装用来实现隧道中实际的运行条件和空间大小。在长期试验中只需对一相进行试验。



图 3.8.3 部分混凝土隧道，直径 3m
(西门子公司授权转载)



图 3.8.4 将有两个三相 GIL 系统的完整隧道
(西门子公司授权转载)

GIL 通过钢支架固定在隧道混凝土壁上，如图 3.8.5 所示。GIL 的外壳管通过特弗龙制成的滑板或滚轮敷设在钢支架上，特弗龙是含碳的，有导电作用，共同组成外壳管可靠接地系统的一部分。轴向补偿器用于补偿热膨胀，当电流加热时 (5h) 或电流切断冷却时 (7h) 这些补偿器使用金属波纹管来补偿外壳管的热膨胀。长期试验程序的数据见表 3.8.1。

3.8.2.2 试验程序

初始调试试验之后将 GIL 以 130% 以上的额定电流施加一个 5h 的加热循环, 使外壳管的表面最高温度在 5h 后达到 50℃。在冷却程序的交流试验电压是相对地 480kV, 为 400kV 系统的相对地额定值的二倍。

在总试验时长 2500h 中间段, 模拟进行了 GIL 的现场修理, 包括对 5m 长的段的更换和在 3 天内重新进行调试。

如表 3.8.1 所述, 修理之后长期试验的第二个程序结束试验。在持续 2500h 的试验结束后, 进行了同样的工频电压、操作冲击和雷电冲击电压的调试试验。已完成的长期试验未发现 GIL 有任何问题。基于敏感 UHF 测量方法的 PD 测量得到恒定的低值, 接近于零。未检测到老化效应。

表 3.8.1 中所列的长期试验程序用图 3.8.1 表示更加清楚。长期试验根据 GIL 标准 IEC62271-204^[54] 以工频、操作冲击和雷电冲击电压的型式试验开始。该初始型式试验表明, 该 GIL 试验装置是正确组装的。

初始型式试验开始时, 通过以小步骤缓慢增加试验电压来对高压系统进行调试。与此同时, 局部放电测量设备连接到 GIL, 对 PD 强度进行持续监测。在初始型式试验程序的最后, GIL 是没有局部放电的。

加热和冷却程序给设备最大应力。当接通额定电流 130% 的电流时, 导体和外壳的升温将引起管道最大程度的膨胀, 1~2h 后达到最终结束温度。5h 以后电流切断, 导体和外壳管会收缩, 机械应力和运动将使 GIL 管道回到冷却状态。在 GIL 的收缩和运动的过程中, 施加双倍额定电压的高电压以证明高电压系统的可靠性。几个小时 (3~4h) 后再次达到起始温度, (7h 后) 再次接通电流, 重启循环。

由电流通断来加热和冷却以及高压试验持续进行 105 天, 模拟 GIL 50 年的寿命。测量设备用于测量 PD、隧道沿线的导体和外壳上的温度、外壳管的运动、施加电压和电流^[34]。

3.8.2.3 隧道中的现场敷设

长期试验装置的一个重要目标是要证明现场敷设方法的可行性, 即在实际的工作条件下使用现场敷设的方法, 良好的试验结果证明现场敷设的方法是正确的。

需要特别小心地验证装配过程的清洁度。这是高电压气体绝缘系统所需要的。在 GIS 工厂这种清洁度要求是十分清楚的, 并且很好地结合在 GIS 的制造工艺中。目标在于将这些方法运用于现场 GIL 的装配。其原理是: “假设气体间隔是清洁的, 那么它将在整个装配过程保持清洁”。这听起来很简单, 但在现场相对复杂的组装过程中并不容易完成。GIL 长期试验的优异结果证明该装配方法是正确可靠的。

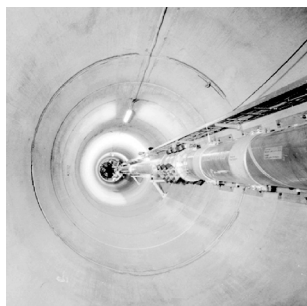


图 3.8.5 在隧道中对一相 GIL 进行长期试验 (西门子公司授权转载)

灵敏 UHF 局部放电测量方法用于在高电压下检测内部的清洁度。超高频传感器检测到的信息是非常灵敏的，可以检测到 GIL 中自由移动的颗粒或其他不均匀的位置所在，甚至非常小的颗粒。使用内置的颗粒陷阱经证明是非常可靠的，这使得内部气室可以在高电压老练期间摆脱自由颗粒。因此，未在高电压试验中检测到内部电弧。

GIL 的可靠性已通过 50 年模拟寿命得以证明，现场实际装配表明了其对工业项目的强大适用性。

焊接

使用现场高度自动化的轨道焊接工艺对接头进行焊接。如图 3.8.6 所示现场试验外壳管在焊接帐篷内连接。

外壳管的轨道焊接主要有两个难题：需要气密并且作为压力容器是机械上可靠的。气密性不允许焊缝存在空隙，这些空隙可能连通使得气体流失，现场每处焊缝百分之百通过超声波探伤验证。多层焊缝的原理参见图 3.8.7。

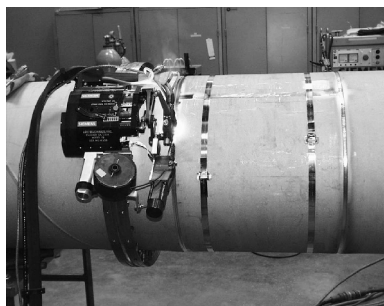


图 3.8.6 外壳管的焊接
(西门子公司授权转载)

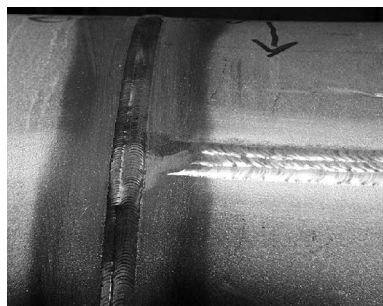


图 3.8.7 外壳多层焊缝顶视图
(西门子公司授权转载)

基于现场环境，焊接方法和超声波焊接检查并未出现任何问题，因此铝管的焊接方法可视为高质量可靠的方法。

相对外壳，导体管要求不同。导体管焊缝必须是表面光滑，因为它是在高电压下承载电流，需防止产生高损耗。

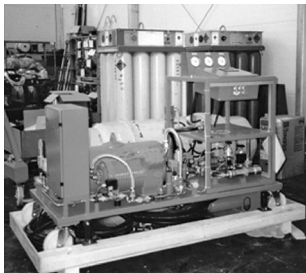
电铝材料可以通过轨道焊接机进行焊接，达到外观要求，它不需要机械返工。这非常有利于现场操作。导体管的焊接示于图 3.8.8。

气体处理

在现场使用新开发的计算机控制的混合装置进行气体混合（见图 3.8.9）。气体混合过程是持续的，对于 GIL 所选的混合气体有非常高的精度。该混合气体存储于标准气室，不会分离。再充气时，储存的混合气体经过滤和干燥，并能调整为不同百分比的混合气体。气体混合装置具有很高的充气速度，因此长距离的 GIL 可以在很短的时间进行充气。



图 3.8.8 导体管的焊接
(西门子公司授权转载)



3.8.9 气体混合设备现场应用
(DILO 授权转载)

预装配

如图 3.8.10 所示的预装配的 GIL 段用于在隧道内实现连接，预装配的 GIL 段需要在洁净室条件下进行，避免灰尘和颗粒进入高压气室内部。工作和环境条件需要随时在现场敷设过程中加以控制，严格的现场质量保证体系必须到位以确保清洁装配^[36]。



图 3.8.10 GIL 段预装配
(西门子公司授权转载)

现场高压试验

400kV N_2/SF_6 混合气体 GIL 的高电压试验按照 IEC62271-204^[54] 中给出的建议进行。20% $SF_6/80\% N_2$ 混合气体的高电压试验值与纯 SF_6 相同，这些试验值是按照电网的要求，这些试验值应用于工厂的型式试验。现场试验 IEC 标准建议 80% 的型式试验值。现场试验是非型式试验，只是为了证明 GIL 的正确装配。表 3.8.2 中列出的值为高电压型式试验值，表 3.8.3 列出了高电压现场试验值^[75]。

表 3.8.2 400kV 高压型式试验值

型式试验	单位	数值	条件
短时交流耐受电压 (U_d)	kV	630	1min
操作冲击电压 (U_s)	kV	1050	15 个脉冲 (50/250 μ s)
雷电冲击电压 (U_p)	kV	1425	15 个脉冲 (5/50 μ s)

表 3.8.3 400kV 高压现场试验值

现场试验	单位	千伏	条件
现场交流耐受电压 (80%) (80% 短时交流耐受电压 U_d)	kV	504	1min

与现场工频试验同步，局部放电监测也得到了应用^[76]。局部放电测量清晰展

示了高压气室的内部条件。超高频测量技术的高灵敏度能够明确指出 GIL 的现场装配是否正确。建议将其作为 400kV 及以上电压水平的质量控制手段^[77]。

如果 GIL 长于 100m 时, 相关长度的物理效应也须予以考虑。在不同的长度之间: 10m (实验室试验装置)、100m (实际尺寸样机) 和 1000m 的 GIL (典型长距离 GIL 安装长度) 存在差异。

在 100m 处, 1.2/50 μ s 雷电冲击电压在 0.3 μ s 后在开口端产生反射, 这些反射导致在试验装置的不同位置产生更高的电压水平。降低的电压上升陡度可以帮助限制最大值, 包括 $\pm 3\%$ 允许极限值以下产生的反射。100m 处电压增加时间将少于 20 μ s^[37,146]。

由外部产生的冲击电压确实有谐振性能, 因为这样的谐振发生器体积较小, 成本更低。谐振试验电压发生器通过试验装置的电容并使用电感来构建一个谐振回路。谐振电压的倍增是一个典型的值。电压升高时间受电感线圈选择的影响。这种谐振试验设备是相当小的, 所以即使出现 (原) 试验设备太大而难以运输的情况时, 现场试验仍可进行。

现今, 频率为 30 ~ 200Hz 的试验电压应用于额定电压高达 800kV 的设备。最大充电电流 10A 限制了设备的规格和长度。对于 GIL, 这意味着目前可用的设备使得 20km 长 GIL 的现场试验成为可能。

基于超高频方法的局部放电测量已证明是非常敏感的测量系统, 用于检测内部出现的故障 (如移动的颗粒或导体上不均匀的尖端)。该超高频局部放电传感器具备的灵敏度可到达 GIL 内 500m, 以找到不允许的颗粒或不均匀的位置。长期试验的样机在 100m 长的试验装置两端各装有一个传感器, 用于满足所要求的灵敏度。

超高频局部放电检测

局部放电传感器的要求 (灵敏度) 已刊载于一些出版物^[112,214,219]。为了证明超高频局部放电测量系统对 N_2/SF_6 混合气体的有效性, 在 GIL 的末端放置了确定的针。通过记录幅度、相位角和脉冲数, 证实在纯 SF_6 中对缺陷的解释是可以使用的^[207,208]。

老练

当对 GIL 施加高电压时, 可以检测到局部放电, 并通过局部放电系统以图形的形式呈现。当电压保持恒定, 可以看出局部放电活动逐步减弱并会在自由移动的颗粒停留在内置的颗粒陷阱内时完全消失。该颗粒陷阱处于低电场区域, 使自由移动的粒子远离高电压领域。所谓的 APH 图如图 3.8.11 所示, 展示脉冲的幅度、相位角和数量。

两个检测到的噪声信号是外部的噪声, 因为三相系统中内部噪声受到局部放电测量系统 (见图 3.8.11) 抑制。

3.8.2.4 隧道中的现场修理

修理过程的原理是, 切割出特定长度的 GIL 段, 并用一个新的 GIL 单元来代替

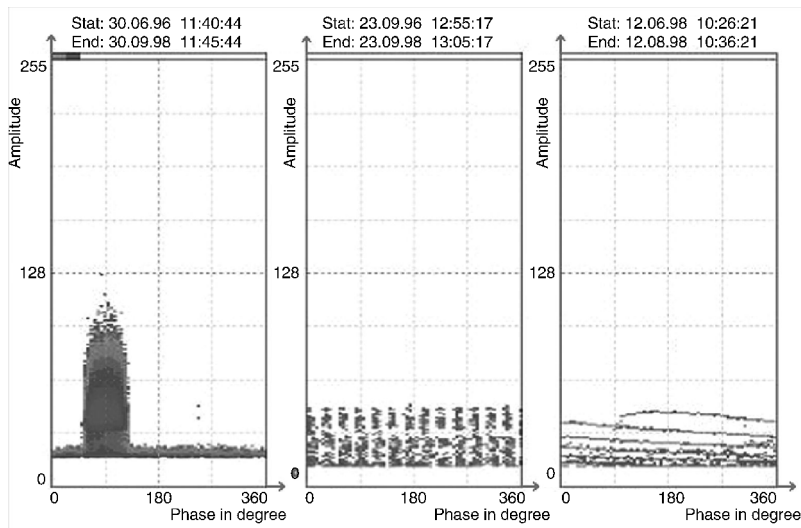


图 3.8.11 局部放电测量。左边：导体上确定的针，距离传感器 70m 远；中间和右边：检测到的 A 和 B 噪声信号（西门子公司授权转载）

它。工作开始之前，需要抽空并存储绝缘气体。然后切割外壳管，将外壳管推入补偿器，以此打开一个间隙。切割导体，取出所需的段。维修段的还原方式刚好相反，最后由轨道焊机进行焊接。

图 3.8.12 展示的 GIL 部分即为切断外壳和导体管的部分。

长期试验其中一个重要组成部分是对真实条件下的现场修理进行验证。因此，该单相试验装置延伸了 5 个 GIL 外壳管，以在 3m 隧道内模拟两个三相 GIL 系统。在这个区域内进行了模拟维修，切割出 2m 长的 GIL 段，并重新装入新的 GIL 段。

全部维修只需三个工作日即可使 GIL 回归正常操作。这种维修表明了必要时可以在隧道内对 GIL 进行短时间维修。

任何技术都可能会失效，即使某些问题发生概率很低。基于现实条件的现场维修是非常必要的。当 2500h 的长期试验进行了一半时，现场维修过程根据实际工作条件进行了验证。GIL 部分被切出，并用修补的部分替代。总维修时间为 3 天，GIL 即可恢复运行^[37]。

3.8.2.5 隧道中的试验结果

在较高电压（2 倍 U_r ）和较高的电流（1.3 倍 I_r ）条件下 2500h 的长期试验验证了隧道敷设 GIL 的可靠性。试验包括实际现场装配过程，以及总时长一半时间后

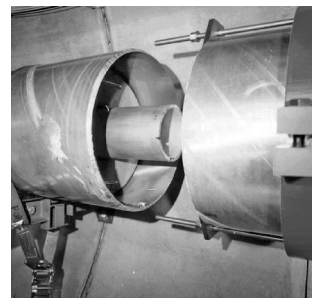


图 3.8.12 切断外壳和导体管以进行维修置换（西门子公司授权转载）

进行的修复过程。所有单个工艺步骤如焊接、气体处理、装配、清洁、调试和现场试验都得到应用而没有发现问题。长期试验证明了 GIL 的 50 年寿命及其高度可靠性。

实际无老化

长期试验表明几乎检测不到老化效应。在 2500h 长期试验结束时，完整的高压试验程序施加到 GIL，并未出现任何故障。工频电压、操作冲击电压和雷电冲击电压已施加到 GIL，该 GIL 已使用 130% 的额定电流的持续试验 2500h^[195]。

可靠的 N_2/SF_6 混合气体

用 N_2/SF_6 混合气体的 GIL 已通过长期试验验证了其高可靠性。 N_2/SF_6 混合气体主要具有较高的电负性，因此电晕稳定因素在 SF_6 低于 10% 时占主导地位。当 SF_6 比例为 20% 时，绝缘能力达到纯 SF_6 近 80%。 SF_6 的灭弧能力大大减少了 50% 以上，但对于没有任何开关元件的 GIL 来说是不需要的。

结论

约 30m 的型式试验原型和约 70m 的隧道敷设长期试验都得到积极的结果。电气、热学和机械方面的要求都通过实验室试验和实际条件下现场试验装置得到满足。

采用 GIS40 年的经验所证明的成熟试验程序来适应 GIL 的需求。对于高电压试验，建议使用变频谐振试验设备和超高频局部放电监测仪^[75]。

3.8.3 直埋敷设

3.8.3.1 直埋敷设的试验装置

在德国柏林的 IPH 试验室，持续 2500h 对一个 100m 长的 GIL 进行了试验。GIL 的试验装置直接敷设在两个地下混凝土竖井之间的土壤里。现场装配工作和敷设过程根据真实的现场施工条件完成。GIL 试验设置包括所有的 GIL 单元——直埋的直线单元和转角单元和最后放置在末端两个竖井的隔离单元和补偿单元。试验布置如图 3.8.13 所示。试验设置还包括一个“空间曲线”用于直线 GIL 直埋。这种“空间曲线”向水平和垂直方向弯曲，弯曲半径 400m。提高的 480kV 试验电压引发发电老化以模拟 50 年电寿命。如图 3.8.14 所示，总试验程序具有 6 个周期，每个周期 480h。

直埋 GIL 的长期试验

直埋 GIL 的长期试验在 100m 长的试验装置上进行，如图 3.8.13 所示。图 3.8.13 显示了把高电压连接到竖井 1 的 IPH 高压试验室。

从竖井 1 直埋 GIL 100m 长的沟渠，包括弹性弯曲和直埋转角模块，连接到末端的竖井 2。在竖井 2 处，接地开关闭合电流回路。在竖井 1 设电流注入装置。

在沟渠旁的焊接集装箱中，使用轨道焊机接合直线 GIL 段。利用起重机从附近装配厂房输送已组装好的 GIL 单元至焊接集装箱。直埋 GIL 的电气部分与隧道敷

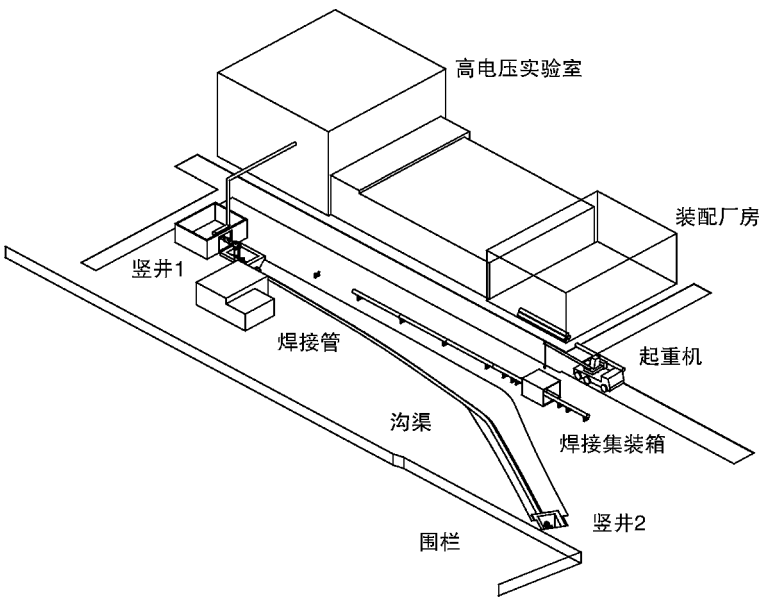


图 3.8.13 现场直埋长期试验的布置（西门子公司授权转载）

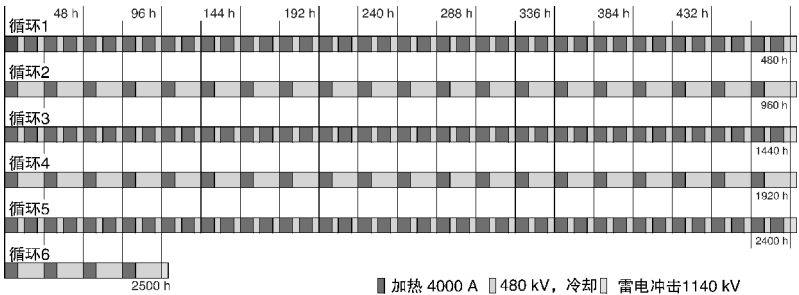


图 3.8.14 长期试验周期（西门子公司授权转载）

设 GIL 部分相同。因此，装配、气体处理、轨道焊接和试验都是相似的。直埋 GIL 的一个特点是被动防腐蚀保护。

参数

400kV 的 GIL 系统进行了长期试验，该系统是按照如下 IEC 规定的绝缘和电流试验的型式试验值设计的^[54]。绝缘型式试验值示于表 3.8.4。

表 3.8.4 绝缘型式试验值

电压型式试验	单位	值
额定电压 U_r	kV	400
最高电压	kV	420
PD 测量短时工频电压	kV	630
操作冲击电压	kV	1050
雷电冲击电压	kV	1425

所有试验装置都通过了绝缘型式试验。使用超高频局部放电监测系统在工频电

压试验时对局部放电进行了测量。这种测量技术能够对气体绝缘系统内部进行极为灵敏的测量，即使在长距离的情况下也能检测到小的干扰。同轴 GIL 系统是一种理想的高频传输系统，所以即使距离长，强度小至约 5pC 也是可检测到的。

超高频局部放电测量技术已经证明对于高电压下 GIL 的老练过程是非常有效的。短路耐受试验值如表 3.8.5 中所示。

表 3.8.5 短路耐受试验值

电流型式试验	单位	值
峰值短路电流	kA	165
短时电流	kA	63
短路电流持续时间	s	3
电弧故障电流	kA	63
电弧故障电流持续时间	s	0.5

试验装置中所有 GIL 单元都进行了电流试验，包括隔离单元、直线单元、转角单元和补偿单元。所有试验都顺利完成，并无任何问题出现。

长期试验循环

为了以可行的和合适的敷设方式来敷设 100m 长的试验装置来模拟 50 年工作寿命，对敷设和调试过程进行了检查。在持续总共 2500h 的长期试验中，通过 4000A 电流 8h 的加热，将电气和机械应力作用于 GIL。经过一个加热程序后施加冷却程序 4h 和 16h，并施加额定电压两倍的相对地高电压 480kV。较高的电压会加速老化进程，因此用大约 3 个月来模拟 50 年电寿命。

在达到 2500h 之前，每 480h 或 20 天的程序以短长周期程序重复交替。在每个周期结束时施加 1140kV 的操作冲击电压来模拟整个网络中的切换操作。

3.8.3.2 直埋敷设试验程序

用于监测和运行的二次技术的典型设备已结合到长期试验中。局部放电测量被用于在调试过程和 2500h 试验中高压绝缘的质量控制。绝缘气体的气体密度通过测定气体压力和气体温度再计算气体密度进行持续测量。浪涌行波的电子传感器被整合用于检测内部电弧的位置。

温度传感器沿着 GIL 放置在外壳管的顶部、底部和侧面的各个位置。导体管的温度通过射频表面波滤波器测量得到导体的实际温度信息。当电流加热 GIL 时，在末端和中间部位的距离传感器对外壳管的运动进行检测。

测量数据

在长期试验中，物理数据的测量主要为了获取热力、机械和电子计算工具的信息。这些计算工具后续被用于确定项目的 GIL 布局。

直埋 GIL 的单相长期试验为 GIL 的功能性提供了实际证明。作为用于高额定功率的输电技术，GIL 是未来地下长距离输电系统，可取代或补充目前的架空线^[46,74,141,142,146]。GIL 的导体和外壳的温度，以及由于热膨胀/收缩引起的 GIL 运动在负荷周期得到监测。所有试验都顺利执行^[147]。

直埋试验和隧道敷设试验对比

隧道敷设 GIL 和直埋 GIL 的要求和尺寸不同。由于加热和冷却不同，隧道敷设的 GIL 周期为 12h，直埋 GIL 周期为 24h。隧道敷设 GIL 的额定电流为 3200A，直埋 GIL 的额定电流为 4000A。因此，隧道敷设 GIL 的直径为 500mm，直埋 GIL 的直径为 600mm。

为了检查 GIL 系统的适用性，各方面都做了尝试以执行接近真实情况的试验装置。因此，隧道敷设 GIL 安装在现场的混凝土管组成的隧道（总长 70m）。而直埋 GIL 则放置于相应土壤中（总长 100m）。预验证试验包括几部分，见表 3.8.6 和表 3.8.7。

表 3.8.6 隧道敷设和直埋 GIL 的试验参数对比

	GIL 试验参数， 隧道敷设		GIL 试验参数，直埋	
调试	交 流 耐 压 试 验 1min	630kV	交流耐压试验 10s	550kV
	雷电冲击试验	1300kV	交流耐压试验 1min	504kV
	操作冲击试验	1050kV	雷电冲击试验	1140kV
	PD 监测		PD 监测	
维修过程后再调试	交 流 耐 压 试 验 1min	630kV	交流耐压试验 10s	550kV
	雷电冲击试验	1300kV	交 流 耐 压 试 验 1min	504kV
	操作冲击试验	1050kV	雷电冲击试验	1140kV
	交流 48h	480kV	PD 监测	
	PD 监测			
最终试验（隧道 敷设 2500h）（直埋 敷设 2880h）	交 流 耐 压 试 验 1min	630kV	交流耐压试验 10s	550kV
	雷电冲击试验	1300kV	交 流 耐 压 试 验 1min	504kV
	操作冲击试验	1050kV	雷电冲击试验	1140kV
	交流 48h	480kV	PD 监测	
	PD 监测			

表 3.8.7 隧道敷设和直埋 GIL 的负荷周期对比

隧道敷设 GIL 试验参数			直埋 GIL 试验参数		
负荷周期	总时长	2500h	负荷周期（每 480h 时间参数改 变）	总时长	2880h
	单个循环持续 时间	12h		单个循环持续 时间	12/24h

(续)

隧道敷设 GIL 试验参数			直埋 GIL 试验参数		
	循环次数	210		循环次数	120
	加热电流, 7h	3200A		加热电流, 7h	4000A
	高压, 5h	480kV		高压, 4/16h	480kV
中间试验, 每 480h	操作冲击试验	1050kV	中间试验, 每 480h	操作冲击试验	1140kV

长期试验的目的在于模拟 50 年寿命过程可能产生的电气和机械应力。这是通过应用试验参数的负荷电流和高电压周期来实现。

3.8.3.3 现场直埋敷设

现场装配和敷设主要有两个原则。一个是连接沟槽旁边的 GIL 长段（例如 200 ~ 300m），然后将 GIL 段放入沟内。另一种是在一个竖井上连接 GIL 段，竖井间距离通常为 1000m。然后将该 GIL 段放置于沟槽中。至于哪种方法最适合要看现场情况、现场环境可达性以及机器和工具的可用性。

装配帐篷

轨道焊接、超声波焊接试验、现场混合气体、现场腐蚀保护和现场试验都得到开发以满足现场各种预期情况，如潮湿、灰尘、温度变化、雨、雪和冰等。为了满足质量要求，所用装配帐篷如图 3.8.15 所示。



图 3.8.15 装配帐篷
(西门子公司授权转载)

高压清洁的条件下 GIL 的安装已证明了该敷设过程的适用性，以及为该解决方案开发的工具和程序的可用性。

现场最终装配于沟渠旁或竖井结构中进行。装配的位置取决于受当地条件支配的土木工程设计。最终位置敷设完成后，装配也随之结束。

沟渠

基本按照管线敷设技术构建沟渠和敷设 GIL。图 3.8.16 展示了直埋 GIL 的一个典型沟槽轮廓。周围的基床垫料通过摩擦力吸收热膨胀。此外，基床能驱散损失的热量。GIL 从外壳到土壤的热量传递必须通过垫层材料的高效热传导性得到保证。根据 IEC 标准，从外壳到地面的转变温度不得超过 50℃，以避免土壤永久性干化。在图 3.8.15 所示沟槽中的 GIL 可以连续输电 2250MVA^[38]。



图 3.8.16 沟渠轮廓
(西门子公司授权转载)

竖井

竖井结构用于布置隔离模块和膨胀节。此外，带通信系统的二次设备也位于该处。

在图 3.8.17 中，竖井的原理示于截面（上部）和鸟瞰图（下部）。原理示出 GIL 部分的长度为约 1km，该长度代表高电压的一个气室。在竖井中，隔离单元（1）分开了气室并使气体监测传感器、局部放电传感器和充气阀得以安装。

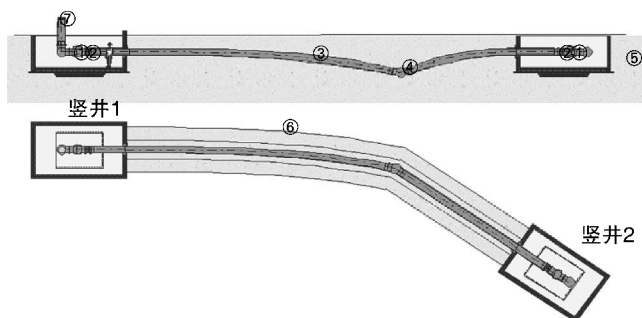


图 3.8.17 竖井（西门子公司授权转载）

在 GIL 作为以弯曲半径为 400m 的直线单元（3）放入沟槽之前，热补偿单元吸收了竖井中 GIL 的热膨胀。达到第二竖井之前，沟渠内可能会埋设用于方向变化的转角单元（4）。沟槽的深度通常为 1 ~ 3m。竖井也可以用来将 GIL 连接至架空线路或变电站的 GIS。

- （1）隔离单元
- （2）补偿单元
- （3）弯曲半径为 400m 的直线 GIL
- （4）转角单元
- （5）竖井
- （6）沟渠（深度为 1 ~ 2.9m）
- （7）高电压和电流连接

3.8.3.4 直埋敷设的修理

除了上述具有机械和电气应力的试验，持续 960h 后长期试验程序中断，实施计划维修过程（包括管长度的置换），如图 3.8.18 所示。GIL 段的替换全过程包括高压试验的重新调试耗时不到两周。

现场使用了新开发的计算机控制混合装置进行气体混合。该混合过程持续进行，对于该 GIL 所选混合气体达到极高精确度。

GIL 中最严重的故障为内部电弧。维修过程分为诊断时间和维修时间。诊断时间是指使用电弧故障定位测量系统、电流图和电弧时间分析故障和评估损害。

在前面 1 ~ 3 天，将所有工具和设备带到所在位置。第 4 天及第 5 天开始维修，

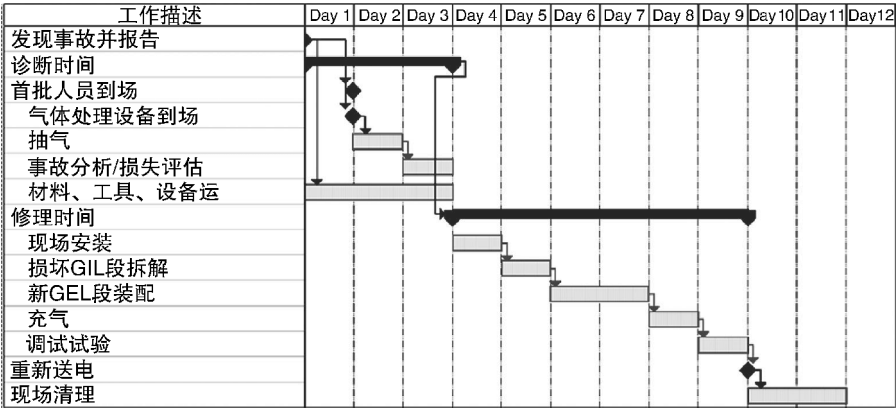


图 3.8.18 维修一览表（西门子授权转载）

先开始现场安装，打开沟槽和拆卸受损的 GIL 部分。第 6 天和第 7 天装入新的 GIL 段，该 GIL 段充有绝缘混合气体，同时进行现场压力试验。第 8 天和第 9 天将进行调试，第 10 天则进行重新通电，维修随之结束。

该混合气体存储在标准的高压气体容器内（最多 20MPa），在重新调试之后可再利用。维修程序表明，GIL 可以在现场直接进行维修并重新投入使用，没有任何问题。维修只需要简单的工具和很短的时间，非常容易执行。

调试试验

出于调试的目的，有必要进行全面的电气和机械试验，以确保直埋 GIL 的特性。除了验证绝缘性能和检查所用的二次设备，后续试验必须如表 3.8.8 进行。

建立长期试验时，模拟一个三维曲线以考虑外壳的最小允许弯曲半径。通过提高电压和电流应力的方式验证其 50 年的使用寿命。

表 3.8.8 调试和重新调试^[38]

试验	测量
压力试验	压力容器法规验证
气密性试验	检查法兰接合
混合气体状态	混合比率
	充气压力
	露点
防腐涂层	10kV/1min
电压试验	
电阻试验	主回路

二次设备

此外还引用了 GIL 二次设备的典型元件。因此在试验过程中，调试和试验时都

进行了 PD 测量。对气体的属性比如温度和压力连续进行监测, 并进行电弧定位。GIL 导体和外壳的温度及气体密度由无线电控制的传感器在多个地点进行确定。竖井结构中和沿线的位移传感器记录了 GIL 相对于地面或建筑物的运动, 以研究 GIL 的力学性能。

在长期试验的过程中, GIL 的基本物理变量用于调整预测, 对于 GIL 进行描述并记录。除了电压和电流施加在系统上的电应力之外, 上述的温度和运动也载入记录。

3.8.3.5 直埋敷设的热计算

3.8.3.5.1 普通直埋敷设

如第 3.2.16 节解释, 敷设于土壤中 GIL 的热设计是复杂的工程任务。它对 GIL 的可靠运行、避免过热来说至关重要。长期试验也证明了用于热计算模型的可用性。

为了确认 GIL 的可靠性, 柏林实验室进行了长期埋设单相试验, 为期 6 个月, 敷设于土地下, 深度在 0.7 ~ 3m 之间。管的总长度为约 100m。埋设的 GIL 循环经受高额定电流 (4000A) 和高电压, 对应加热和冷却阶段。循环周期和电流负荷的选择, 使得外壳管和导体的温度保持低于允许温度, 同时模拟了其 50 年的服务周期。进行广泛温度测量是为了监测 GIL 的温度并且将它们与计算值进行比较。从 8 月初至 11 月底 (夏季和秋季条件) 期间 GIL 投入运行, 从未中止。埋设 GIL 的长期试验时长增加到 104 天, 总共进行 159 多个子循环, 其中 120 个短期子循环为 60 天, 39 个长期子循环为 44 天。试验操作的整个持续时间整个线受到加热阶段 4000A 的电流影响。

GIL 及其周边土壤通过导体和外壳循环电流产生热量形成热耦合系统。对流和辐射将导体的热损失转移到外壳, 而在通过传导形成的环形传热是可以忽略不计的。该热量从外壳加重了焦耳效应引起的损失, 主要向径向方向上的土壤表面消散, 再通过对流进入空气中。土壤参数引用了柏林土壤性质的各种文献。

在对 GIL 的热行为性能进行非稳态研究之前, 开发了稳态模型, 考虑了固体本体传导、圆柱形腔的自然对流以及土壤表面和空气之间界面的辐射和对流的机制。热系统分为两部分 (GIL 和环境土壤), 针对每个部分所发生的物理现象。有限元法 (ANSYS 程序) 首先被用来检查开发的分析模型的准确性, 然后对所示埋设的 GIL 热行为进行不稳定分析报告。

这里开发的模型考虑了固体本体传导、圆柱形腔的自然对流以及土壤表面和空气之间界面的辐射和对流的机制。热系统分为两部分 (GIL 和环境土壤), 针对每个部分所发生的物理现象进行研究。

表 3.8.9 提供了 GIL 计算参数。输电能力由额定电流 1700A 进行定义。当额定电压为 420kV 时, 这等同于约 1250MVA 的输电能力。土壤和 GIL 或电缆周围回填土的热阻系数为 1.2Km/W。

表 3.8.9 GIL 技术参数

GIL	导体	外壳	防腐蚀
材料	铝合金	铝合金	PP 涂层
外直径/mm	180	517	523
厚度/mm	10	8.5	3
电导性/($\text{m}/\Omega \cdot \text{mm}^2$)	30.0	21.30	X
热导性/(W/mK)	X	X	0.286
辐射发射率	0.2	0.2	X
热导性/(W/mK)	X	X	0.286
电流/A	1700	1700	X

3.8.3.5.2 直埋计算模型

有限元方法被用于计算中。热损失、热传递系数与该导体和外壳管之间的环形间隙的热阻都按照 IEC 60287 标准^[53]使用稳态方法，作为瞬态计算的常数进行计算。位置 1 GIL 的截面使用表 3.8.10 中的参数进行计算。

表 3.8.10 截面参数

参数	单位	值
覆盖 h	m	$h = 0.7$ (对于第二个位置为 $h = 2.6$)
热传导性	W/mK	$\lambda = 1.6$
土壤温度	$^{\circ}\text{C}$	$T_s = 15$
土壤温度初始值	$^{\circ}\text{C}$	$T_i = 20$

土壤的热阻系数在试验初期于三个不同地方进行测量（线的两端和中心点），每一处取两点进行测量，深度范围为 0.90 ~ 2.30m。所测量的平均热电阻从 0.46 ~ 0.80 mK $\cdot$ W 变化，也就是说，极端的测量值之间存在 70% 的差异。测量结果表明从平均值呈广泛分散状态。计算中使用的热电阻被作为测量结果的平均值。边界情况见表 3.8.11。

表 3.8.11 边界条件

参数	单位	值	注解
土壤和空间的界面	$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$	20	传热系数
空气温度	$^{\circ}\text{C}$	15	测定空气温度
初始土壤温度	$^{\circ}\text{C}$	20	距离 GIL20m 远
土壤平分线	W/m^2	0	热损耗（对称条件）

试验运行

埋设的 GIL 在 4000A 电流下运行了 8h，然后短周期切断电流 4h。长周期为运行 4000A 电流 8h，以及切断电流 16h，见表 3.8.12。这些试验周期包含于总试验时长 2500h，每个短长周期均为 480h。

表 3. 8. 12 直埋 GIL 的周期负荷

参数	单位	值	注解
短循环			
8h/ = 4000A	W/m	145	损耗
4h/ = 0A	W/m	0	损耗
长循环			
8h/ = 4000A	W/m	145	损耗
16h/ = 0A	W/m	0	损耗

3. 8. 3. 5. 3 直埋的计算和测量比较

深度： $h = 1\text{m}$

为了比较所测量的温度与计算出的温度，模拟了整个试验过程 GIL 的加热。外壳管的上部（TM1）、下部（TM3）和侧面（TM3）16 天所测量的和所计算的两个循环的温度（周期从 1. 9. 99 ~ 16. 9. 99）示于图 3. 8. 19。计算与实测值一致。最高温度在短周期内缓慢上升，8 天后达到 35℃。第二时段期间，冷却从 4h 延长至 16h，这就是为什么在 GIL 系统中温度会下降的原因。在此情况下，外壳管最高温度低于 33℃。

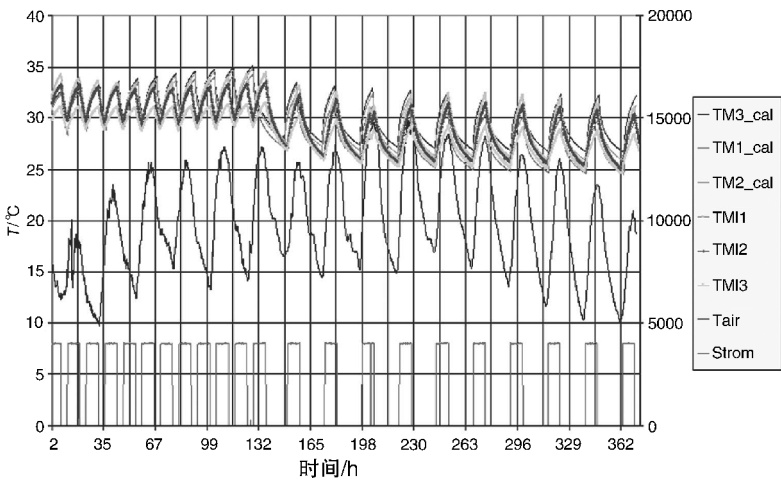


图 3. 8. 19 测量和计算深度为 1m 的温度：直埋 GIL 额定负荷电流的数值和实验结果比较；长期试验；短循环和长循环（西门子公司授权转载）

计算不同于测量，由于通过自然对流从内部导体向外壳管热量转移的效果未被纳入计算考虑，其显示的是外壳管的下侧外周的最高温度。外壳管的上部和下部温度的不同可通过土壤的电阻变化进行解释。

图 3. 8. 20 展示了所计算的加热阶段时间为 188h（7. 8 天）在土壤中的温度分布。假定试验过程中测量的温度基于空气温度的边际条件。白天和夜间的温度分布

仅显示地面正下方上层土壤的差别。由于在夜间空气温度低，这可通过空气和地面之间的热传导来解释。GIL 的热传输更好，因为土壤中的温度较低。昼夜之间的空气温度波动不会由于负荷变化特别影响 GIL 和土壤的温度分布^[78]。

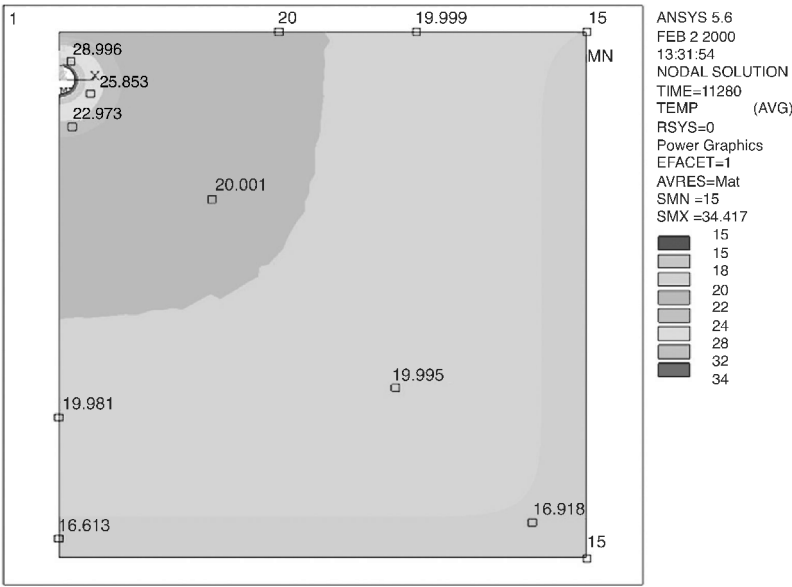


图 3.8.20 历时 188h 深度 1m 的温度计算（西门子公司授权转载）

深度： $h = 2.9\text{m}$

上述同一期间（1.09.99 ~ 16.09.99）试验进一步就 2.9m 的深度进行模拟。图 3.8.21 和 3.8.22 展示了计算和测量的比较。

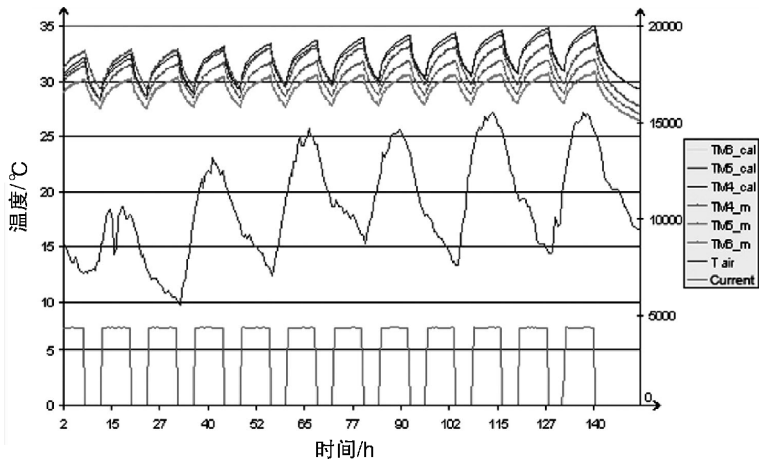


图 3.8.21 测量和计算深度为 1m 的温度；直埋 GIL 额定负荷电流的数值和实验结果比较；长期试验，深度 2.9m；短循环（开启 8h，关闭 4h）。周期从 2.09.99（即图中的 0h）~ 7.09.99（即图中的 155h）、（西门子公司授权转载）

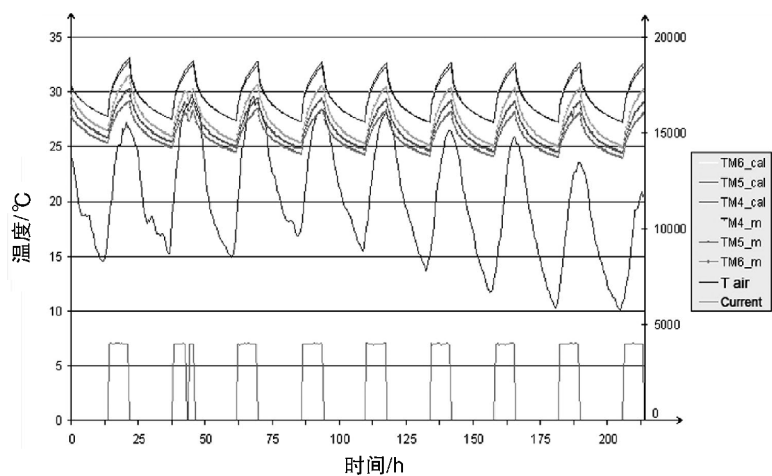


图 3.8.22 测量和计算深度为 1m 的温度：直埋 GIL 额定负荷电流的数值和实验结果比较；长期试验，深度 2.9m，长循环（开启 8h，关闭 16h）。周期从 7.09.99（即图中的 0h）~ 16.09.99（即图中的 255h）（西门子公司授权转载）

在这方面计算和测量也保持了良好的一致性，特别是在第一周期时 GIL 受到短周期电流的影响。计算表明底部和顶部的温度比侧面的温度高，且有小于 2℃ 的温差。底部的温度比顶部的温度略高（ $dT \leq 0.5^\circ\text{C}$ ）。

与此相反，试验表明底部、顶部和侧面温差相当大，顶部高，而底部低。在本例中，由于内部导体和外壳管之间的不稳定的自然对流效果，管的圆周温度不恒定。

3.8.3.5.4 直埋过负荷案例

在本节中展示了实际应用情况下埋设的 GIL 和其周围土壤的热性能。双 GIL 系统（六相）埋在地下 1.2m（从土壤表面到管轴线的距离），相之间的轴向距离为 1.3m。GIL 的外壳表面由厚度为 3mm 和热电阻系数为 3.5Km/W 的聚丙烯防腐蚀层进行保护。土壤和 GIL 周围的回填土的热阻系数取为 1.1Km/W。土壤温度为 35℃，空气温度为 40℃。这些值用于计算温暖地区埋设系统的夏季额定电流。于 7MPa（绝对）的压力 20℃ 下，绝缘气体取为氮气（N₂）和六氟化硫（SF₆）的混合气体。

下面展示两种计算的结果，第一种是非稳态恒定电流额定值（ $I = 1700\text{A}$ ），第二种是非稳态不同周期负荷的额定电流（1700A，2040A，2500A，3400A）。

第一种的计算

用连续的恒定电流额定值（100% 负荷系数）进行非稳态计算，模拟时间为 4500h（6.25 个月）。

模拟结果表明（见图 3.8.23），经过 4500h（186 天），未达到完全稳态，外壳

温度约为 60℃。因为邻相的热输入（在稳定状态约 69℃；见图 3.8.24），中间相的温度最高。每个阶段的最高温度是在底部和侧面。侧面温度是因为受到其他相的影响，而底部则是因为从底部到土壤表面的热阻比从顶部到土壤表面越大。

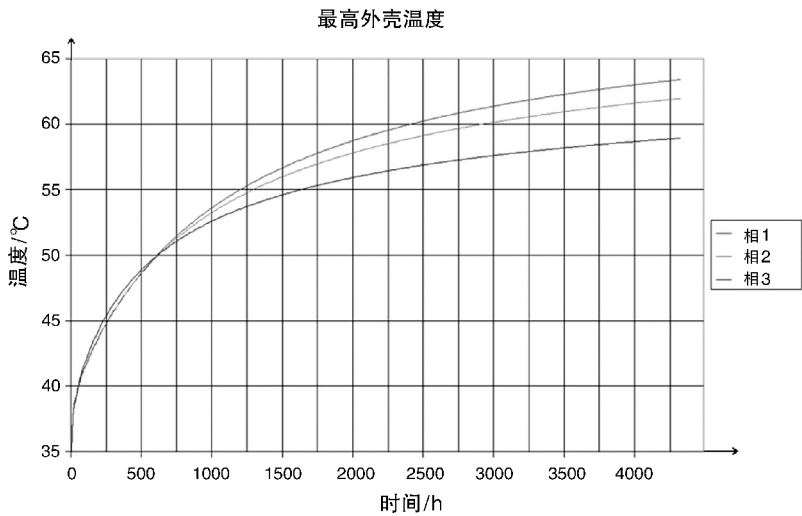


图 3.8.23 4500h 后 100% 负荷系数连续恒定额定电流（西门子公司授权转载）

计算参数：

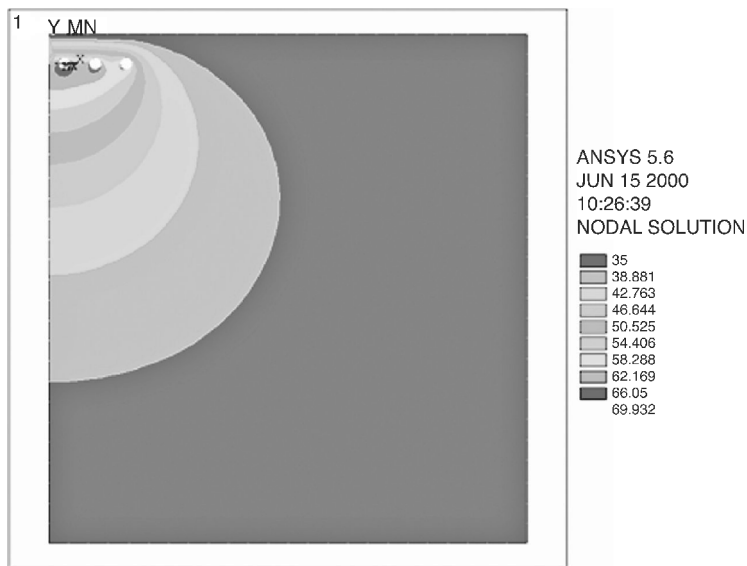


图 3.8.24 100% 负荷系数连续恒定额定电流达到稳态（西门子公司授权转载）

相 1：温度最高相即中间相底部的最高温度。

相 2：第二相底部外侧的最高温度。

相 3：外侧相侧面的最高温度。

第二种的计算

用负荷系数为 100%、120%、150% 和 200% 进行非稳态计算。模拟以 1700A 的额定电流进行，系统的初始温度值和周围的土壤温度为 35℃，2400h 后（100 天）系统在 720h（30 天）周期内过载 120% 或 150% 或 200%（见图 3. 8. 25）。

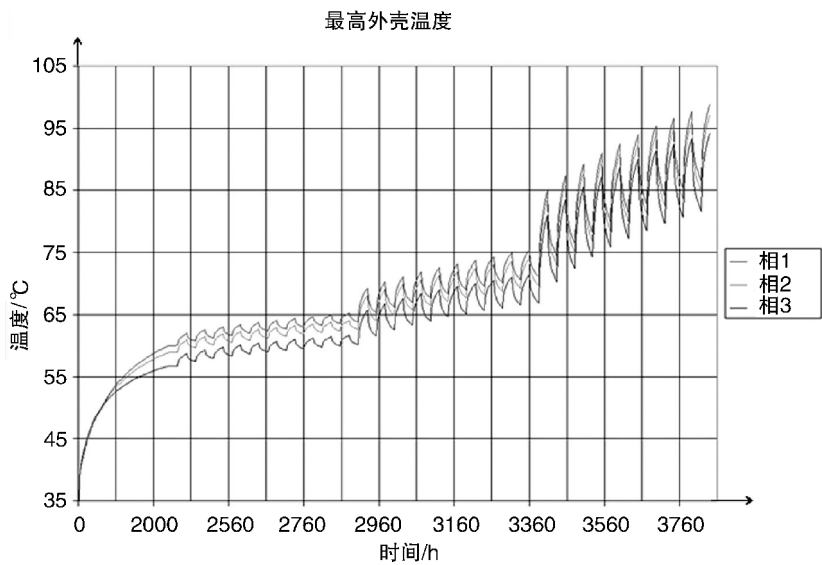


图 3. 8. 25 过载电流（西门子公司授权转载）

- 从 0 ~ 2400h：连续额定电流 1700A。
- 从 2400 ~ 2880h：负荷周期 1 包括两个 24h 周期，分别对应额定电流 2040A 和 1700A。
- 从 2880 ~ 3360h：负荷周期 2 包括两个 24h，分别对应的电流额定值为 2550A 和 1700A。
- 从 3360 ~ 3840h：负荷周期 3 包括两个 24h，分别对应的电流额定值为 3400A 和 1700A。

模拟结果表明，经过 100 天未达到完全稳态，外壳温度约为 60℃。随着 GIL 超载 200%，200h（8.3 天）后达到导体和外壳外别达到最高温度 105℃ 和 95℃。凭借 150% 的过载模拟结果表明，3200h（134 天）后未达到 GIL 的最大允许温度。这意味着，GIL 可在连续额定 2550A 的电流下进行输电，并可以超载 200% 8 天以上。

计算参数：

模拟额定电流 1700A 的双系统 GIL。

模拟时长 3840h (160 天)

从 0 ~ 2400h: 1700A

从 2400 ~ 2880h: 负荷周期 1 (以 2040A 运行 24h, 以 1700A 运行 24h)

从 2880 ~ 3360h: 负荷周期 2 (以 2550A 运行 24h, 以 1700A 运行 24h)

从 3360 ~ 3840h: 负荷周期 3 (以 3400A 运行 24h, 以 1700A 运行 24h)

相 1: 温度最高相即中间相底部的最高温度。

相 2: 第二相底部外侧的最高温度。

相 3: 外侧相侧面的最高温度。

3.8.3.5.5 直埋对比结果

单相 GIL 埋设于 IPH 实验室 (柏林高压研究所) 地下, 对应加热和冷却阶段, 循环受到大电流和高压影响。埋设 GIL 的长期试验时长延长到总共 2500h。试验运行的整个时间中, GIL 受到加热阶段 4000A 的电流影响。

为期 2 周的两类循环和两个位置通过计算和测量的温度的对比, 深度分别为 1m 和 2.9m。计算与试验值吻合。试验表明, 外壳管周围的温度不恒定, 顶部温度最高, 底部最低 (最大温差为 3℃)。热量通过自然对流从内部导体向外壳管传送, 造成顶部的高温。由于未将对流纳入考虑, 计算无法清楚展示这种差异^[78]。

埋入地下的双 GIL 系统的模拟应用表明, 6 个月后并未达到完全稳态。中间相温度最高, 各相的最高温度在其底部和侧面^[78]。

3.8.3.6 直埋敷设的长期试验结果

直埋 GIL 的长期试验证明了长距离输电解决方案的实用性。所述 N_2/SF_6 混合气体的绝缘性能是可靠的, 在绝缘能力方面显示出长期稳定性。基于 3200A 的连续电流 (额定电压 400kV, 相当于超过 2000MVA 输电能力), 低于 50℃ 的温升证明 GIL 作为一个大功率输电系统, 电损耗低, 可靠性高。

在内部电弧故障的情况下, GIL 的机械布局是可靠的, 除了其他作用于 GIL 的热动力或电力, 对环境不产生任何外部伤害或影响。这从试验程序的高额定值得到证实。

GIL 顺利通过所有上述试验程序, 证明其优异的性能和高度可靠性, 包括二次设备。因此, 从技术观点来看, GIL 是地下输电系统的另一种选择, 有很多运行优势。

GIL 长期试验的结果验证了现场现实条件下技术、经济和环境方面所预期的效果。以下列出已发现的主要指标是值得提及的:

- GIL 能在相当长的距离输电 2000MVA。
- 比起架空线或电缆, 它的传输损耗更低。
- 尽管距离长, 相对于电缆它不需要进行无功补偿。
- 内部故障不会造成外部影响。

使用 N_2/SF_6 混合气体的隧道敷设 GIL 和直埋 GIL 都通过所有型式试验和长期

试验,效果良好。整个试验过程没有出现任何故障,所以 GIL 可靠性非常高,是经济型的大容量输电系统。

3.8.4 长期试验结果

长期试验的结果表明,使用 N_2/SF_6 混合气体的 GIL 技术可靠。GIL 证明了其可将架空线的大额定功率直接应用于地下,而不降低额定功率。

N_2/SF_6 混合气体的使用仅限于绝缘;因为灭弧能力的减弱,混合气体隔室不允许开合。气室内不允许开合操作、断路器、隔离开关和接地开关。在处理过程中,已证明 N_2/SF_6 混合气体的使用和现场气体处理是可靠和实用的。

发展计划

该发展计划主要有以下两个基本程序:

- 1) 对 GIL 进行型式试验以证明高电压设计。
- 2) 对 70m 长隧道和 100m 长直埋 GIL 试验装置进行长期试验。

该发展计划于 1995 年开始,与法国电力公司(EDF)合作开展第一个程序。基于该研究结果,与柏林的公共事业公司 Bewag 合作对隧道进行长期试验。

型式试验结果

型式试验的结果总结如下:

几十年来对 N_2/SF_6 混合气体的绝缘能力进行了持续的研究。大部分的测量已在小规模试验装置中进行,但足以阐明 N_2/SF_6 混合气体的基本性能。 N_2/SF_6 气体的混合比率为 80% N_2 和 20% SF_6 ,具有可靠性和适用性。

基于 IEC 62271-204^[54],GIL 通过工频、雷电冲击和操作冲击试验电压的所有试验要求。63kA 短路电流和高额定电流(4000A)的大电流性能都试验成功。与大电流相关的电动力是同轴单相绝缘 GIL 的基本强度。

电流高达 63kA 的电弧故障试验结果显示如下:没有对外造成影响,因为未造成外壳烧穿或压力释放装置开启,其主要原因是弧根在电弧期间趋向分散。

灭弧能力对开合操作来说不可或缺,较纯 SF_6 相对减弱。对于 GIL, N_2/SF_6 混合气体的电弧行为具有优势,因为其没有造成烧穿(这对于 GIS 和断路器来说是缺点因为降低了开合能力)^[146]。

长期试验结果

对于隧道长期试验,已与柏林 Bewag 合作建立一个 20°角 70m 长的混凝土隧道。基于现场真实条件对试验装置进行装配。长期试验计划包括热力、机械和电应力以模拟 50 年的寿命。

初始调试试验后,将 GIL 以额定值 130% 以上的电流应用到一个 5h 的加热周期,使最高温度在 5h 后达 50℃。在冷却程序的交流试验电压是双倍额定值 420kV。为了达到起始温度,对隧道强制性进行冷却。

在总试验时长 2500h 中间段,模拟进行了 GIL 的现场修复,包括 5m 段长的更

换和 3 天内进行重新调试。长期试验的第二程序进行了最终试验，试验值与调试试验相同，以此结束试验。已完成的长期试验未发现 GIL 有任何问题。基于灵敏 UHF 测量方法的 PD 测量表明恒定的低值，接近于零。未检测到老化效应。

GIL 的 50 年模拟寿命证明了其可靠性，基于现实条件的现场装配则反映了其对工业项目的强大适用性。2010 年德国克尔斯特巴赫安装了第一个 400kV 变电站项目，并于 2011 年开始投入运营，详见第 2.2.2A 和 7.2.13。

3.9 气体处理

3.9.1 概述

GIL 是充气的高压系统，这种气体的主要作用是电气绝缘，该气体不会在内部移动，它会在 GIL 的整个使用周期中保持在气密舱内，使用的气体 (SF_6 和 N_2) 是惰性的且无毒的，充气压力相对较低，典型值为 0.8 MPa，充气的金属外壳直接接地且可以提供高的人身安全性，这主要由于外壳材料的壁厚，自动化的焊接过程能确保 GIL 段的连接在 GIL 的整个使用周期中都是气密的。

气体处理是一个闭环的过程，其中的绝缘气体总是保存在容器的内部，这种气体处理的过程可以避免气体泄露到大气中， SF_6 气体的使用是有规定的，在气体处理的每一步都有数量和质量的規定。IEC62271-303^[58] 和 IEC 62271-4^[51,60] 给出了详细的气体处理指导以确保气体处理过程的安全性和经济性。

3.9.2 混合气体处理

为了处理 N_2/SF_6 的混合气体，需要一些设备来抽真空、分离、存储以及充入 N_2/SF_6 的混合气体^[7,209]，在图 3.9.1 中展示了气体处理需要的设备。

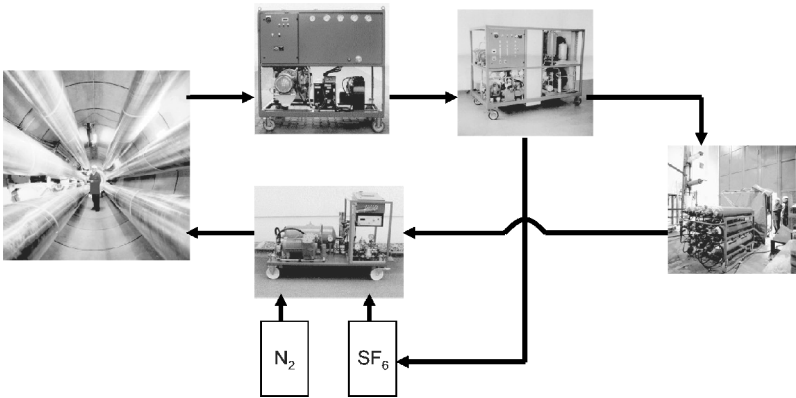


图 3.9.1 混合气体处理 (由 DILO 授权转载)

在带有真空泵的 GIL 系统中 (1), 气体会被抽出 GIL 系统, 然后气体被过滤器分离 (2) 为纯净的 SF_6 以及剩余的含有低浓度 SF_6 的 N_2/SF_6 的混合气体, 剩下的 N_2/SF_6 的混合气体中 SF_6 的含量低至 1% ~ 5%, 以便于储存在 20MPa 高压的标准钢瓶中 (3), 整套的钢瓶设施可见于图片 (3)。这套钢瓶还可以扩展, 可以存储 1km 长度的 GIL 段的气体, 纯 SF_6 需要在高压下以液态形式存储 (4), 给 GIL 系统充气或补气, 需要一个气体混合装置 (5), 包括一套连续的气体监测系统用于监测气体的温度、湿度、 SF_6 含量以及气体流量, 气体混合装置使用纯净的 N_2 (6)、 SF_6 (4) 以及已存储的含有少量 SF_6 的混合气体, 该混合装置需要调整在 GIL 中选定的 N_2/SF_6 的百分比 (例如 80% 的 N_2)。

这些气体处理装置使得混合气体能够使用和重复使用形成完全循环, 在正常使用中 SF_6 和 N_2 不会被完全分离, 因为混合气体需要重复使用, 例如, 在 GIS 中所使用的完全分离的 SF_6 可以在 SF_6 的制造工厂中完成, 重复使用的气体需要满足文件 IEC61634^[149] 和 IEC 62271-4^[51] 的要求。

气体储存

N_2/SF_6 混合气体的概念是指混合气体只要是在使用中都要保持混合状态, 只有在 GIL 中使用 (例如: 20% 的 SF_6 和 80% 的 N_2) 时以及用于存储时 (1% 的 SF_6 和 99% 的 N_2) 气体的比例才会变化, 当存储在容器或钢瓶中时氮气会被压缩到高达 20MPa 的高压中以节省存储空间。 SF_6 可以在较低的压力下以液态形式存储, 这就会降低所需要的存储容量。对于长达 1km 的大型气室, 需要将若干个容器连接在一起。

气体混合系统

为了处理超大的气体容量以及需要的气压, 已经开发了一种自动化的气体混合系统, 如图 3.9.2 所示, 这种气体混合系统可以产生任何需要的混合比例且其误差小于 1%, 在充气前使用 AlO_2 过滤器来干燥气体可以达到正确的露点温度。充气温度需要持续监测并储存在计算机中以进行气体质量的控制。

气体混合系统要遵循连续的气体混合控制的原则, 该混合技术允许混合气体在分子混合的水平上充入 GIL 中, 这就意味着气体能完全混合且没有 N_2 和 SF_6 分离情况的存在。

3.9.3 结论

对于 N_2 和 SF_6 的混合气体, 目前已有标准的充气和混合装置, 气体混合过程已

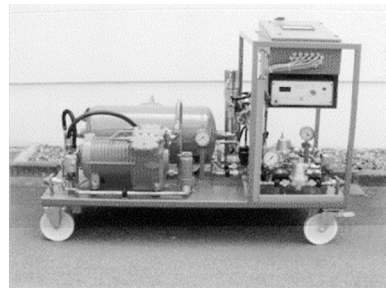


图 3.9.2 现场应用的气体混合装置
(由 DILO 公司授权转载)

实现自动化且全部充气过程已能受到计算机系统的监控。

GIL 中的绝缘气体总是保存在内部的容器中以使只有极少量的气体会泄露到空气中。

气体处理机器可以用过滤器来清洁混合气体，以便于 N_2/SF_6 混合气体能够重复使用。

气体处理装置也允许在合理的时间内处理大容量的气体，例如，长达 1km 的 GIL 气室。充气过程可以在一天内完成。

如果 N_2/SF_6 混合气体不再需要的话，可以将该混合气体送入 SF_6 气体的制造厂家进行完全分离以及在 GIS 设备中重复使用 SF_6 气体，重复使用的气体的纯净度应遵循 IEC 标准中的规定。

3.10 调试和现场试验

对于 GIL 的调试，需要进行大量的电气和机械试验。装配完成后通过试验来验证 GIL 的所有元件安装正确。

现场试验不是对设备重复进行型式试验。现场试验用于证明设备的正确装配和安装，而不是验证设计。这是通过设计或型式试验完成的。这就是为什么试验使用了 80% 的型式试验电压的缘故。420kV GIL 的值见表 3.10.1。

现场高压试验与局放测量同时进行。在 80% 的型式试验电压下必须是无局放的，这意味着值要低于 5pC。

表 3.10.1 GIL 420kV 现场高压试验值

	型式试验/kV	现场试验/kV (80% 水平)
工频 1min 试验	630	504
雷电冲击电压 (1.2/50μs)	1425	1140
无局放电压	520	504

图 3.10.1 中，现场工频试验由空气/ SF_6 套管与谐振频率试验设备连接。高压试验变压器（右侧）由耦合电容器（位于试验变压器旁）通过空气/ SF_6 套管连接到气体绝缘设备。所选耦合电容用于达到试验变压器的电感和耦合电容器的电容以及气体绝缘设备的电容谐振的频率。这种谐振试验方法具有用相对小型的试验设备通过谐振升高电压达到试验电压值的优点。

图 3.10.2 展示了气体绝缘试验变压器连接到气体绝缘系统。该试验方法仅在空间有限的情况下使用，即当在建筑物内或在隧道中进行现场试验。对于 GIL，单相长度为几公里可以在现场通过这种设备进行试验。为实现这一点，全部输电线路被分成几公里长的试验段（通常为 1 ~ 2km）。如表 3.10.2 所示，这种试验方法允许用 80% 的型式试验电压作为现场高压试验电压来对完整的输电线路进行试验。



图 3.10.1 连接空气/SF₆ 套管的谐振频率试验设备显示现场试验工频
(Alstom Grid 授权转载)



图 3.10.2 连接气体绝缘系统的
气体绝缘试验变电器

除了高电压试验，表 3.10.2 中所列为部分调试试验。

表 3.10.2 现场调试实验

压力试验	压力试验定义基于 EN 标准和国家标准，在投入运营前验证承压的 GIL
气密性试验	对焊缝和每个法兰连接面的气密性进行 100% 试验
混合气体	检查混合气体百分量 SF ₆ （20%）和 N ₂ （80%），并使用气体处理装置出报告
气体压力	检查相对温度的混合气体的压力，以保证所需气体密度（充气密度）
气体湿度	检查 -20℃ 露点温度以确保混合气体的低湿度
气体密度	对每个气室都进行气体密度测量，由气体密度计向控制中心反馈报警信号
被动防腐保护试验	直埋后，被动防腐保护试验为 10kV/min。如敷设于隧道或者地面上，通常不需要防腐保护
主动防腐保护试验	直埋 GIL 需要主动防腐保护，并在调试前进行试验
导体电阻	主电路的电阻根据标准进行试验以证明连接正确

压力试验

GIL 的外壳管、隔离单元、转角单元气密绝缘件是按照压力容器标准设计的。GIL 现场装配成输电线路，这些标准和法规要求在现场进行压力试验以证明该压力设备的装配正确性和安全性。

根据当地法规和焊接接头质量控制类型，调试前将以最大工作压力 1.1 或 1.3 倍进行压力试验。该试验通常是用干燥空气或氮气进行。在一些国家，试验需要在主管机构代表的监督下进行。

气密性试验

隔离单元、补偿器和转角单元的任何 O 形圈密封都用 SF₆ 传感器设备（气体嗅探器）检查其气密性。焊接接头的每个焊缝都进行 100% 超声波试验检查。

混合气体

混合气体由气体混合系统控制。在充气过程中，对 SF₆ 的百分比、每分钟的充气体积、充气过程中的气体温度和湿度进行测量，并就每个气室做出报告。

在充气过程中，检查已充气的 GIL 混合气体的正确性（例如，20% SF_6 和 80% N_2 ），几天后再次确认。

气体压力

测量气体压力，并使用气体温度计算气体密度。对于这一点，需使用精确的气体压力表，每个气室分别控制。

气体湿度

气体湿度的露点必须低于 -20°C ，以避免湿度达到露点。绝缘子表面气体凝露可能引起放电，在运行温度范围内任何情况下都需要避免。

气体密度

气体密度是电气绝缘的重要参数。因此，使用气体密度计监测每个气室的气体密度，该气体密度计向控制中心发送监控信号。通常分为两个阶段信发送号：

阶段 1：气体损失报警

阶段 2：自动闭锁

在某些情况下设定两个气体损失报警阶段。通常是压力损失达到 10kPa 后发出报警信号。当气体压力低于最小工作压力时，启动自动闭锁。这可能是气体压力低于充气压力 0.1 ~ 0.2MPa。所有值都在 IEC 标准 62271 - 204^[54] 给出建议。

被动防腐蚀保护

被动防腐保护涂层在现场进行检查，通常对焊接段进行 10kV 1min 的高电压试验。外壳管在工厂进行涂覆，防腐层的高电压试验也在那里进行。现场接合部的焊接进行防腐蚀保护涂覆，高电压试验也在那里进行。

主动防腐

除了被动防腐，主动防腐也用于避免腐蚀。GIL 的外壳管保持一定的电压（约 -1V ），牺牲电极会被腐蚀。

现场试验是为了测量 GIL 外壳的电势以及保护电路中的电流，该值在被动防腐涂层没有出现裂缝或孔时为零。

导体电阻

测量导体的电阻是为了证明每个导体段的正确接合。因此需注入一个测量电流，例如，IEC 标准 62271 - 204^[54] 推荐的电流是 100A。

第 4 章 系统和网络

4.1 概述

在本章中，将主要介绍 GIL 输电系统和 GIL 作为电网系统的一部分对电网运行安全的影响。由于 GIL 有着物理上的结构特点，所以它最适合用于大容量的传输。凭借 GIL 内部大直径的铝导体和外壳，GIL 可以承载更高的电流。这就需要铝导体管的最小壁厚能保证足够的机械稳定性，以及大的截面积承载大电流的能力。GIL 的耐压水平取决于采用高压力的气体和具有高绝缘水平的 SF_6 和 N_2 的混合气体，这样，实际上和电压等级的增长相比，GIL 的内绝缘的尺寸的变化并不大（例如，500kV GIL 到 800kV GIL，直径只从 500mm 增加到 650mm）。凭借大电流和高电压，GIL 的传输能力可以从 3000MVA 增加到 6000MVA。

为保证高性能的 GIL 接入电网系统，在 GIL 的安装前，需要调研一些参数对电网运行的影响。这些参数包括：线路的物理参数、线路损耗、运行、老化、安全性、维护、维修及运行的监视等。

4.2 GIL 的线路参数

4.2.1 理论基础

GIL 用气体的电气绝缘能力和铝导电管承载电流的能力构成了输电系统。内部的环氧树脂绝缘件组成的固体绝缘仅占 GIL 总体积的 0.1% 以下。这使得 GIL 在电气性能上和架空线是相似的，只是导体密封在外壳中。该外壳可以消除外部环境，如灰尘和潮湿空气对 GIL 的影响，保持了 GIL 的电气性能的稳定性。稳定的 GIL 的物理参数保证了 GIL 的电气性能。

气体的绝缘性能决定了 GIL 的尺寸。这意味着固体绝缘件在 GIL 应用的电气性能远低于环氧树脂的理论电气性能，其相对电气常数 ϵ_r 约在 3.5 ~ 4.5 之间。因此，在 GIL 运行的整个电气寿命内，不会发生电气老化的问题。

线路参数和外壳的尺寸、气体绝缘及铝导电管有关。

4.2.2 电阻

电阻和导体的直径和壁厚及材料有关。对于导电管，采用了电导率最高的电气

铝材。

电气铝材的纯度高于 99.5%。对于外壳管，选用高强度的铝合金来满足高达 0.8MPa 的气室压力，并承受来自土壤负荷的机械力，以及热胀冷缩和弯曲力。材料选用 AlMg_3 或 $\text{AlMg}_{4.5}$ 。典型的电阻值见表 4.1^[132]。

表 4.1 典型的电阻值

额定电压/kV	直径/mm	壁厚/mm	每相米的典型交流电阻/ $\mu\Omega$
145/170	240	15	18
245/300	310	12	16
362	380	12	13
420/550	500	10	11
800	630	10	10
1200	760	10	8

4.2.3 电容

GIL 的电容由它的尺寸和绝缘气体来决定。由于固体绝缘仅占 GIL 的容积的 0.1%，所以可以忽略掉。GIL 的设计是导体在外壳中的圆柱形结构。绝缘气体的介电常数是 1。不同直径的 GIL 的典型电容值见表 4.2。GIL 的电容值是架空线的 2 倍，只是采用固体绝缘的电缆的 $1/3 \sim 1/4$ ^[132]。

表 4.2 GIL 的典型电容值

额定电压/kV	直径/mm	壁厚/mm	每相米的典型电容/pF
145/170	240	15	59
245/300	310	12	52
362	380	12	53
420/550	500	10	54
800	630	10	45
1200	760	10	42

4.2.4 电感

GIL 的电感由外壳和导体的尺寸及直接接地的外壳来决定。绝缘气体和内部绝缘子的影响可以忽略。由于圆柱形的电场设计和直接接地的外壳，GIL 的电感相对较小。表 4.3 给出了不同直径的 GIL 的电感值^[132]。

表 4.3 GIL 的典型电感值

额定电压/kV	直径/mm	壁厚/mm	每相米的典型电感/ μH
145/170	240	15	0.187
245/300	310	12	0.211
362	380	12	0.210
420/550	500	10	0.205
800	630	10	0.247
1200	760	10	0.260

4.2.5 阻抗

GIL 的阻抗取决于电容和电感。但主要是来自于电容，该值在 GIL 空载运行时是最高的。随着负载的增加，电感也在增加，在额定电流时，GIL 就接近运行在正常的负载下，此时电感和电容几乎相等，传输功率是有功功率，阻抗仅是电阻。

4.2.6 波阻抗

波阻抗由下面的公式来计算。

$$Z' = \omega \sqrt{L/C}$$

当 GIL 接入输电网络时，对于 GIL 的暂态特性，波阻抗是很重要的参数。暂态电压在不同波阻抗的连接点被反射。该反射和连接点的波阻抗有关，需要在系统的绝缘配合中进行研究^[123]。

表 4.4 给出了 GIL 的波阻抗。

表 4.4 GIL 的波阻抗

额定电压/kV	直径/mm	壁厚/mm	典型的波阻抗/ Ω
145/170	240	15	56.0
245/300	310	12	63.4
362	380	12	62.8
420/550	500	10	61.5
800	630	10	73.9
1200	760	10	78

4.2.7 自然功率

传输系统的自然功率是指当电感和电容达到相同的值时的功率值。此时，仅传输有功功率。这是电力系统的优化结果。GIL 的自然传输功率为 2000 ~ 3000MVA，取决于设备尺寸，已接近于 GIL 的额定功率。

400kV 的四分裂架空线的自然功率在 700 ~ 900MVA 范围内，400kV 架空线的额定功率在 1800 ~ 2000MVA 范围内。输电系统由于电感的相位角的影响，需要对长距离输电进行容性补偿。在变电站加装大型电容器组。

固体绝缘电缆的视在功率为 5000MVA，但是它实际最优运行在远低于自然功率值。需要加装大型电抗器对电缆系统进行感性无功补偿。大型电抗器尺寸很大并且产生热损耗^[132]。

表 4.5 给出了不同输电系统的自然功率。

表 4.5 400kV 输电系统的自然功率

系统	自然功率/MVA	额定功率/MVA
GIL: 500mm 外壳直径	2000 ~ 3000	2000 ~ 3000
架空线: 四分裂导线	700 ~ 900	1800 ~ 2200
固体电缆: XLPE 交联电缆	4000 ~ 5000	800 ~ 1200

4.3 线路损耗

4.3.1 概述

线路损耗是评价大容量传输系统的一个重要参量。因为采用了气体作为绝缘介质，GIL 的直径较大（如 420kV 的 GIL 的直径为 500mm）。大截面积的 GIL 为保持足够的机械稳定性，对外壳的最小壁厚有要求（如 500mm 的外壳的壁厚至少是 6mm）。这就导致了壳体的大截面积。如上面的例子，外壳的横截面积是 18 700mm²。

由于采用了大截面积的外壳和导电管，GIL 的线路损耗很低。第二个损耗的来源与功率因数补偿单元的阻性损耗有关。由于 GIL 的容性负载特性，需要补偿相位角。由于气体绝缘的原因，GIL 的容性负载很低，因此很少需要补偿。

4.3.2 GIL 的损耗

不同电压等级的 GIL 的电阻率见表 4.6。根据典型的额定电流，可以算出典型的功率损耗。原则上，电压越高、GIL 的直径越大，损耗越低。一定电压下的 GIL 损耗的绝对值随着电流的增大而增加。表 4.6 给出了不同电压下的损耗值。

表 4.6 GIL 线路损耗典型值

额定电压/kV	额定电流/A	每米的线路损耗/W
145/170	2500	120
245/300	3000	150
362	3500	170

(续)

额定电压/kV	额定电流/A	每米的线路损耗/W
420/550	4500	230
800	5000	260
1200	5500	240

4.3.3 与其他输电系统的比较

与其他输电系统的比较是个复杂的任务，这些评价仅在不同输电系统的功能方面。本书对现时常见的 400kV 的输电系统进行分析。表 4.7 给出了对比的技术数据。本次研究的输电系统分别是架空线、充油电缆、XLPE（交联聚乙烯）电缆和 GIL。

表 4.7 不同输电系统的技术数据

型式	架空线 4 × 240/ 40 A/St	充油电缆 1200mm ² 隧道布置		XLPE 电缆 1600mm ² 隧道布置		GIL 隧道布置	
		直接接地	交叉互联	直接接地	交叉互联	φ520mm 接地	φ600mm 接地
热极限功率 S + n/MVA	1790	—	1120	—	1150	2180	3190
热极限电流 I _{th} /A	2580	—	1610	—	1660	3150	4600
电阻 R'/(mΩ/km)	30.4	40.8	23.0	35.7	19.0	9.4	6.9
极限电流下的 损耗/(W/m)	2500A 下 600	—	1650A 下	—	1660A 下	3150A 下	4600A 下
			150		190	380	6.9
1600A 下的损耗	230	310	145	275	177	72	53

德国典型的架空线采用四分裂的 240mm² 截面积的钢芯铝绞线，其中有 40mm² 的钢芯。它的热极限传输功率是 1790MVA，相当于电流为 2580A。充油电缆的铜芯的截面积是 1200mm²，它的热极限传输功率是 1120MVA。由于流经电流屏蔽层的电流的限制，这些电缆通常都是交叉互联方式安装的。XLPE 电缆也类似，内部的铜芯的截面积为 1600mm²。

选用了两种规格的 GIL，一种是 2000MVA 的额定功率，另一种是 3000MVA 的额定功率。它们的极限热传输功率分别是 2180MVA 和 3190MVA，所对应的极限热电流分别是 3150A 和 4600A。

在图 4.1 中，根据不同的输电系统，标出了线损的数值。线损最高的是直接接地电缆。因此，大功率的电力输送不采用直接接地电缆，而是采用交叉互联的电缆。

和电缆及 GIL 相比，架空线的损耗最高。本例中选用的是标准的 1600mm² 的电缆。如今 2500mm² 的电缆已投入使用，其线损和 GIL 几乎相同。和 GIL 的横截面的铝导体的原理一样，采用低电阻的铜芯的电缆可以降低线损。

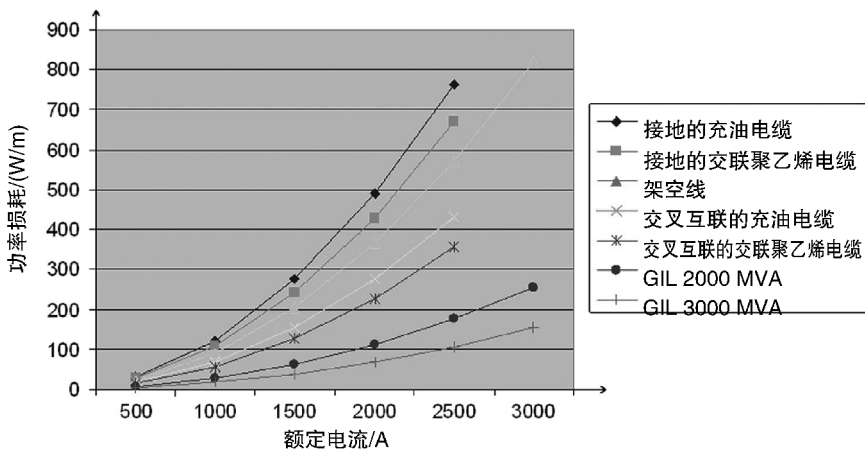


图 4.1 不同输电系统的线损

4.3.4 冷却和通风

对于隧道布置或直埋的 GIL，采用的设计是在额定电流下不需要额外的冷却系统。在隧道中，线损产生的热量将由隧道内自然通风传导到隧道的墙壁，然后墙壁再传导到周围的土壤。当 GIL 直埋在地下时，线损产生的热量就直接传到周围的土壤。周围土壤的热导率可以按低于 GIL 外壳的最高温度来选取——大多数情况下选 40℃^[90,142]。

为提高输送功率，可采用冷却或通风的方法。多种方法都是可行的。

隧道式布置：采用通风竖井交换空气的方法是第一个选择。然后，空气经过冷却后进入隧道可以加快热量散发到隧道外。

直埋式布置：直埋式 GIL 的冷却可以采用高导热性的材料来改善土壤垫层。其次，在土壤垫层下沿输电线路方向敷设水管来冷却。

在任何情况下，对投资来说，通风和冷却的实现都是较昂贵的，而且还有运行期间的维护。因此，应尽可能避免采用额外的冷却和通风。

4.4 运行方面

4.4.1 概述

从电力系统运营商的观点，线路运行方面所关注的是可用性、线路的开合和安全性。从线路运行的角度要求有高的可利用小时数，线路在任何时候都可以断开和闭合以及不会对人身的安全造成影响。目前 90% 的输电网络系统都是架空线，GIL 需要更优于架空线。

现在，架空线在输电网络中占统治地位。架空线有可能雷击导线或铁塔，树木生长碰到高压线会造成接地事故。这些事故都会导致保护系统动作而对线路跳闸。相连变电站的断路器将切断电力。

这些典型的故障，如雷击或树枝引起的接地故障，可在几秒内消除，再经几秒的短时等待断路器重新合闸。通常架空线都能持续运行。这种合闸方式是自动的，称为自动重合闸。

由于这类故障不大可能在 GIL 上发生（雷击和树木对架空线运行的影响很大），由于 GIL 的安全性，即使万一发生内部故障，对 GIL 的外部也没有影响，这样，当 GIL 和架空线一起运行时，也可以进行重合闸操作。

4.4.2 可用性

输电线的可用性指系统几乎在任何时候都可以保持运行。主要在大功率输电系统，断电对电力的供应是一个灾难性的后果。在某些事故中，大功率输电系统的断电可以造成区域性的停电，如我们所知道的近几年在加利福尼亚，美国东北部和意大利的停电事故。

断电的原因可以来自 GIL 的事故或和架空线相连的部位。但来自 GIL 故障的可能性非常小。如今 GIL 在全球有着超过 300km 的运行长度和超过 30 多年的运行时间，至今还没有事故引发停电的报道。一些故障仅是发生在试运行的过程中。经验表明，一旦 GIL 投入运行，几乎可以无故障地运行，没有老化的现象。

大多数运行中的输电网络停电的原因是架空线造成的，通常停电时间都很短。停电的原因可能是线路遭到雷击或树木引起的接地故障。这些故障都可以通过系统的自动重合闸功能来消除。也就是说系统经过几秒钟的断电再恢复。大多数情况可以消除故障使系统恢复运行。

GIL 也可以采用与架空线相同的方式进行重合闸操作。为证明这个操作对输电系统的运行和人员没有危害，GIL 已在实验室内经过了试验，包括 GIL 内部故障的试验。

自动重合闸的功能可以自动关合断路器来使电网通电。如果故障位于架空线，该操作没有危险并不影响电网的安全。

为证明 GIL 的可靠性，在试验室进行了不同的内部电弧试验。在电网中，短路电流距离电源点近的就高，距离电源点越远就越低（参见表 4.8）。

表 4.8 电网中不同位置的短路电流

63kA	400kV 电网中距离电站和电源点的最近的故障电流
50kA	400kV 电网中远离电源点的电站中的最大故障电流
10kA	400kV 电网中远离电站和电源点的单相线路的故障电流

电弧故障的试验参数可以设为 63kA、50kA 和 10kA、切断的时间分别为 0.5s、0.33s 和 0.1s（参见表 4.9）。

表 4.9 电弧故障的试验参数

弧电流	63kA	50kA	10kA
持续时间	0.5s	0.33s	0.1s
弧电压	16kV	16kV	16kV

内部电弧试验的结果表明，GIL 的壳体不会烧穿或打开。因此，对附近的人和设备都没有影响。内部电弧引起的压力的升高不会超过 50%，这在外壳设计压力的运行范围之内（裕度是 250%）。按照给定的时间消除内部电弧后，GIL 还可以施加已耐受过的额定电压。也就是说，即使发生内部故障（这是非常小的概率），GIL 还允许继续运行。

GIL 和架空线相连的电网是可以进行自动重合闸的。这无疑提高了电网的可靠性。

线路的开合 在输电网络的运行中，很重要的一点就是能在任何时候对线路进行开断和关合。采用气体绝缘的 GIL 也有和架空线一样的开合性能。通常架空线的长度远大于 GIL，因此，GIL 的绝对电容量要小于架空线。GIL 的物理电容量是同长度架空线的 2 倍。因此，含 GIL 的输电网络的涌流和纯架空线几乎是一样的。结合先前所阐述的安全方面，GIL 可以和架空线进行一样的操作。

运行的安全性 可用性的安全方面和内部故障的情况有关。为了安全的原因进行了内部电弧故障的型式试验，结果证明 GIL 附近的人员安全是有保障的。

为了考核内部电弧条件下外壳的耐电弧能力，选取 GIL 的主要部件组成试验模块。按照 IEC 标准，采用了典型的布置型式。该布置型式的长度为 25m，这样气体压力的升高（由于电弧的热影响）就在可接受的限度内。实际安装的 GIL 的气室要大得多，这样因内部电弧引起的内部气体压力升高就很小（小于 1bar）。典型布置在试验室进行了组装，装置上为增加安全性加装的防爆膜在试验时没有动作。图 4.2 是在柏林的 IPH 试验室的 GIL 的试验装置。



图 4.2 试验装置，IPH，柏林

总之，正如前面的说明，试验结果证明了 GIL 的内部电弧在试验中和试验后都对周围环境没有影响。没有发生外壳被电弧烧穿的现象，仅外壳的内表面和内部导体的外表面可看到几毫米的铝材表面烧蚀。

电弧试验中和试验后的外壳管内部气压的升高相当低。动作压力设定为高于充气压力 0.8MPa10% 的防爆膜在试验过程都没有动作。

就电弧的移动和最大的弧根温度来说，电弧在 N_2/SF_6 混合气体的燃烧特性有

着更好的表现。原因是和纯 SF_6 相比, 较宽的电弧直径在混合气体内的弧根温度较低, 并且在 N_2/SF_6 混合气体中电弧的电磁力也低。

环氧树脂绝缘子在电弧中也没有严重的损伤。

采用 N_2/SF_6 混合气体的 GIL 是一种安全的输电系统, 可以安装在交通隧道内或桥梁上。

以上说明都是证明了 GIL 运行的安全性; 即使出现非常罕见的内部电弧故障, 对周围环境都没有影响。内部电弧的试验证明, 在隧道内安装的 GIL 对隧道内的人员的安全没有任何影响。

4.5 老化

绝缘气体不会老化。这种效果可以从架空线的运行中看到。如果采用了正确的设计并将电场强度限制在给定的限度内, 不老化的架空线可以隔绝高电压对地。其物理原理就是, 在气体中, 分子是自由移动并依靠热对流来运动。在这些运动中, 自由电子和离子由气体分子所俘获, 送到低电位并释放。GIL 气室中的气体分子的运动将平衡和分配电荷, 这样就不会产生威胁绝缘系统的电荷累积。这是一个持续的过程, 实际上测不出老化现象。

固体材料的老化取决于所选材料的外露面积和限度, 下面是已知的两个老化特性:

- 1) 热老化。
- 2) 电气老化。

热老化在分子层面上改变了物质。每种绝缘材料都有自己分类温度来确定自己的限度。环氧树脂的典型温度极限是 $105 \sim 120^\circ\text{C}$ 。对于 GIL 的技术设计, 该温度给出设计的限度。

典型的固体材料的电气老化产生于电场强度高于 $30 \sim 50\text{kV/mm}$ 。GIL 的绝缘设计的尺寸不是由固体绝缘决定的, 是由气体绝缘决定的, 气体绝缘的系数比固体的低 $3 \sim 4$ 。这样, GIL 设计的最大场强约是 10kV/mm , 因此, 该值远低于电气老化的限度。

在世界各地的试验室进行过气体绝缘系统的串联方式的长期带电试验, 试验的结果都证明了环氧树脂浇铸绝缘子的可靠性。来自不同厂家的不同设计的检测结果都表明环氧树脂浇铸绝缘子几乎不会老化。该检验结果发表在一些技术论文中^[195]。

4.6 内部电弧故障

4.6.1 概述

内部电弧故障在 GIL 的运行中很少发生, 但是有可能发生的故障, 因此在设

计和型式试验中需考虑该故障。根据现行出版的报告中，GIL 在有着 40 多年的运行业绩中，还没有发生过内部电弧故障。对 GIL 的要求是，当发生内部电弧故障时，不能影响周围环境，须将电弧带来的影响（热气体和融化的铝材）限制在 GIL 壳体内部。

为满足这一要求，需要采用大的气室设计。最短的气室也需要 10m。实际中，气室长度要到几百米到 1km。

4.6.2 被动保护

被动保护就是采用坚固的金属外壳来防止内部电弧可能带来的影响。内部电弧故障可以产生炙热的气体并增大内部压力。内部电弧试验验证了 GIL 的壳体可以承受这些力，见本书第 3 章 3.2 节。

除了采用了坚固的金属壳体外， N_2/SF_6 的特性也是被动保护的一大优点，电弧的弧根比在纯 SF_6 气体中大很多，这样弧根的温度就低很多。可避免壳体烧穿，减小电弧对外部的影响。图 4.3 是 63kA 的电流的 500ms 的电弧试验的结果。仅有几毫米的铝材融化。外壳可以耐受内部压力而气体不会释放到大气中。

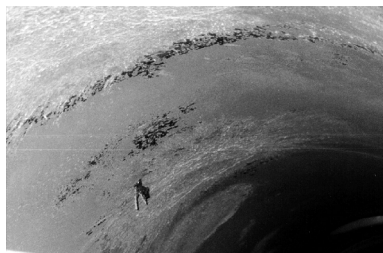


图 4.3 63kA/500ms 内部电弧的影响

采用气密的绝缘子限制的气室也限制了电弧的内部影响。这也减小了因故障所需更换的母线的长度。正如前文所说的，GIL 的设计应该不会发生内部电弧故障，同时 40 多年的运行业绩也证明了这一点^[172]。

4.6.3 电弧定位

电弧定位系统可以持续地监视 GIL 的运行，一旦发生内部故障，该系统可以给出故障点的准确位置。对此，电弧定位系统可以计算电弧故障产生的电波的传输时间。根据 GIL 的长度和内部行波的传输速度，计算内部行波到达 GIL 末端的时间差，可以确定故障的位置。该计算方法的精度是 25m。

电弧定位的重要意义在于可以迅速找到和修复 GIL 的故障段，电弧定位的技术分析请参见第 3 章中 3.3.13.3 节的内容。

4.7 维护

根据电网运行人员的观点，GIL 的维护会影响它的可用性。事实上，由于 GIL 是一个静态系统，仅仅用于电力传输，它不需要有真正意义上的维修。GIL 不需要有开合或开断功能。然而，在 GIL 运行期间，还是建议进行下列的维护工作：

- 1) 隧道或竖井里的 GIL 的目视巡查；

- 2) 系统防腐保护的检查;
- 3) 气体密度继电器的检查。

建议上述目视巡查的间隔时间可以较长,如一年。气体压力和密度的监视,以每一个气室的电气信号来进行,也可在主控室里进行监视^[111,165]。

4.8 维修

对运行中的 GIL 的维修,需要一定的时间,而且线路需要停电。为证明在长期运行后的 GIL 的维修的过程的可行性,对一段隧道内布置和直埋的 GIL (见第 3 章 3.8 节长期运行试验的 GIL 的维修)进行了维修。隧道内的 GIL 的维修时间仅为 3 天,直埋的 GIL 的维修时大约需要一周。当维修工具、储气罐、备用段和事先的维修计划等在维修前都预先准备好后, GIL 的维修过程可以缩短^[60]。

4.9 人员安全

金属外壳使得 GIL 是一种非常安全的输电系统。即使万一发生内部电弧故障也不会对外部产生影响。这些安全特点使得地下隧道安装的 GIL 就像建设地下的公共隧道一样,如铁路、地铁或过街隧道^[151]。

外壳感应电压 安全方面的影响还要考虑外壳的感应电压。为防止感应电压所带来的危险, GIL 必须在每一处接地点都必须牢固接地。

隧道安装的 GIL 通过内部钢结构接地,隧道内混凝土墙里的加强钢和接地网都是相连的。这意味着隧道内的每个人触摸 GIL 的金属外壳都有着同样的电位。

在直埋形式的 GIL,金属外壳上都附着了用于防腐的涂层,这样就避免被直接触摸。竖井内的 GIL 的金属外壳和竖井里的接地系统直接相连。这就和隧道内的 GIL 安装一样,竖井里的每个人都有与金属外壳同样的电位。

防火 GIL 由铝合金的管道,环氧树脂浇注的盆式绝缘子和不燃的绝缘气体组成。这些材料不会增加由于隧道安装或直埋式 GIL 的火灾的危险。内部电弧将限制在内部,不会增加外部的火灾隐患。

4.10 绝缘配合

4.10.1 概述

GIL 设计的绝缘配合,以及输电网的需要,是电网系统集成的电气基础。电网所需要的电气强度主要是能承受电网上的正常操作(如开合)或万一的非正常冲击(如 GIL 所连架空线的雷击或电网上的接地故障电流)。GIL 诸多工程^[152] 30 多

年的可靠的运行业绩证明了 GIL 作为电力传输的高可靠性。最新一代采用混合气的 GIL 同样有着高的可靠性, 该 GIL 在隧道和直埋式安装都经过了长期的试验^[47]。直埋 GIL 的开发采用了这些经验, 并在样机上经过了长期的试验^[152]。第二代 GIL 的第一个应用实例是在隧道中安装的, 位于日内瓦机场附近的充 N_2/SF_6 的 GIL 工程^[44-46]。

在下面的章节中, 将介绍典型的 GIL 在电网中的过电压能力、绝缘配合、所需要的试验电压和型式试验的研究。

4.10.2 典型 CIL 应用的过电压

4.10.2.1 基本布置

举例来说, 典型的 GIL 的基本布置如图 4.4 所示。该图表明 1km 长的 GIL (也可为 10km) 连接了不同设计型式的 400kV 的架空线。左侧的架空线的保护采用了在全长范围内布置的两根架空地线。最后三个输电铁塔 (L1 到 L3) 的高度是 65m, 塔基的接地电阻是 7.5Ω (L2)。右侧的铁塔 R1 和 R3 之间有两根架空地线, 但仅有一回延伸出去。铁塔的高度是 45m, 塔基的接地电阻是 5Ω ^[91]。

4.10.2.2 雷击的最大强度

根据架空线的配置和它们的悬挂绝缘子的长度, 对以下雷击引起的最大冲击进行了评估, 并用于 GIL 的过电压耐受能力的计算^[38]。

左侧的架空线路

- 远处雷击: 2000kV
- 近区直击: 在位置 N1 和 N2 (分别靠近铁塔 L3 和 L1) 的 35kA
- 对铁塔直击: 200kA

右侧的架空线

- 远处雷击: 2000kV
- 近区直击: 在位置 N3 (靠近铁塔 R1) 的 18kA 和在位置 N4 (靠近铁塔 R3) 的 50kA
- 对铁塔的直击: 200kA

4.10.2.3 运行方式

按下面的运行方式, 该基本配置的线路可以用来计算 GIL 的雷电冲击。

输电:

两条架空线由 1km (也可为 10km) 的 GIL 相连。

雷电冲击对架空线产生的过电压:

- 在左侧
- 在右侧

开放末端:

1km 长的 GIL (也可为 10km) 在线路的末端和变电站的一个打开的间隔相连。

雷电冲击对架空线产生的过电压：

- 在左侧
- 在右侧

4.10.2.4 外侧和内侧的避雷器的应用

为保护 GIL 免受过高的雷电冲击和操作冲击造成的损害，位于架空线末端的外置式避雷器以及在 GIL 某个位置上的气体绝缘的金属氧化物避雷器可以防止这种损害。对接地故障系数小于或等于 1.4 的 400kV 系统来说，集成式避雷器的参数如下：

- 额定电压 $U_r = 322\text{kV}$
- 持续运行电压 $U_c = 255\text{kV}$
- 在 10kA (8/20 μs) 的残压 $U_{10\text{kA}} = 740\text{kV}$

对于外部的金属氧化物避雷器，采用德国 400kV 系统上经常应用的这些参数：
 $U_r = 360\text{kV}$ ， $U_c = 288\text{kV}$ 和 $U_{10\text{kA}} = 864\text{kV}$ 。

对以下外置式和集成式金属氧化物避雷器进行了研究。

1km 长的 GIL

在 GIL 两端的两组集成式避雷器（GI00 和 GI20）。

两组集成式避雷器（GI00 和 GI20）和安装于铁塔 L1 和 R1 外置式避雷器（MAA1 和 MAA2）。

10km 长的 GIL

两组集成式避雷器（GI00 和 GI20）以及带或不带两组额外的安装于铁塔 L1 和 R1 的外置式避雷器（MAA1 和 MAA2）。

分别安装在 GIL 两端以及两端以内 1km 处的四组集成式避雷器（GI00、GI20、GM01 和 GM11），以及带或不带两组额外的安装于铁塔 L1 和 R1 的外置式避雷器（MAA1 和 MAA2）。

表 4.10 最大过电压

1km 长的 GIL，运行模式：输电
集成式避雷器 GI00 和 GI20 以及安装于铁塔 L1 和 R1 的外置式避雷器（MAA1 和 MAA2）

雷电冲击		最大过电压水平/kV			
		距离 GIL 左侧末端的距离			
位置	峰值	0 ~ 250m	250 ~ 500m	500 ~ 750m	750 ~ 1000m
L 侧的远距离	2000kV	722	708	722	722
近区直接雷击					
N1	35kV	528	505	545	673
N2	35kV	938	952	942	842
L3	200kA	无反向闪络			
铁塔 I2	200kA	690	702	704	702

(续)

雷电冲击			最大过电压水平/kV 距离 GIL 左侧末端的距离			
L1	200kA	无反向闪络				
R 侧远距离	2100kV	797	798	787	777	
近区直接雷击						
N3	18kA	872	889	890	823	
N4	50kA	727	705	722	636	
R1	200kA	无反向闪络				
铁塔 R2	200kA	无反向闪络				
R3	200kA	无反向闪络				

→904kV

表 4.11 最大过电压能力

10km 长的 GIL，运行模式：传输

GIS 型式避雷器 GI00 和 GI20 以及安装于铁塔 L1 和 R1 的敞开式避雷器 (MAA1 和 MAA2)

雷电冲击			最大过电压水平/kV 距离 GIL 左侧末端的距离			
位置	峰值	0 ~ 500m	500 ~ 5000m	5000 ~ 9500m	9500 ~ 10, 000m	
L 侧的远距离	2000kV	533	540	707	716	
近区直接雷击						
N1	35kV	514	464	485	638	
N2	35kV	915	965	983	935	
L3	200kA	无反向闪络				
铁塔 L2	200kA	492	487	695	696	
L1	200kA	无反向闪络				
R 侧远距离	2100kV	539	556	727	731	
近区直接雷击						
N3	18kA	885	890	826	761	
N4	50kA	696	611	518	563	
R1	200kA	无反向闪络				
铁塔 R2	200kA	无反向闪络				
R3	200kA	无反向闪络				

→904kV

4.10.2.5 计算结果

对于每种运行模式，两种 GIL 长度以及避雷器的各种运行型式，按照各种雷击的可能性对距离 GIL 左端各个位置的最高过电压进行了计算。表 4.10 和表 4.11 给出 1km（以及 10km）的 GIL 在运行模式下的计算结果。图 4.5 和图 4.6 显示在 N2

位置遭受 35kA 雷击沿 GIL 方向的过电压强度曲线。

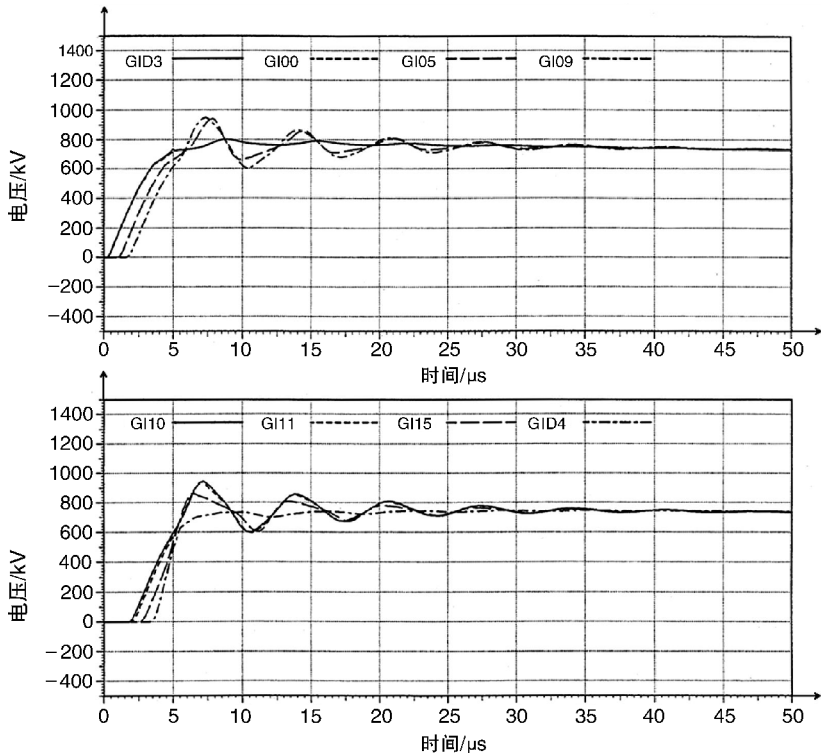


图 4.5 1km 长的 GIL 的过电压的波形

在所有的情况下，最大的过电压位于在 N2 位置（线路的左侧）和 N3 位置（线路的右侧）近区对线路导体的直接雷击。对于各种可能状态下避雷器的运用，最大的雷击过电压强度分别由表 4.12 表示的 1km 长的 GIL 和表 4.13 表示的 10km 长的 GIL。

4.10.3 GIL 的绝缘配合

一般来说，数十千米处雷击引起的过电压将决定 GIL 的绝缘配合，相近长度 GIL 的波阻抗为 60Ω，比架空线的 300Ω 的要低很多，因此在这些地方的操作过电压和雷击相比要小很多。在此，长度达 10km 的 GIL 的线路的绝缘配合仅需考虑雷击造成的最大过电压。

根据已有的大量的 GIL 的设计验证和现场试验的经验，可以按下列的程序来选择长度达 1km 的 GIL 的现场试验电压和型式试验样机长度的试验电压。

现场试验

该试验用于验证现场敷设和装配之后的 GIL 不会出现问题。按 IEC62271 -

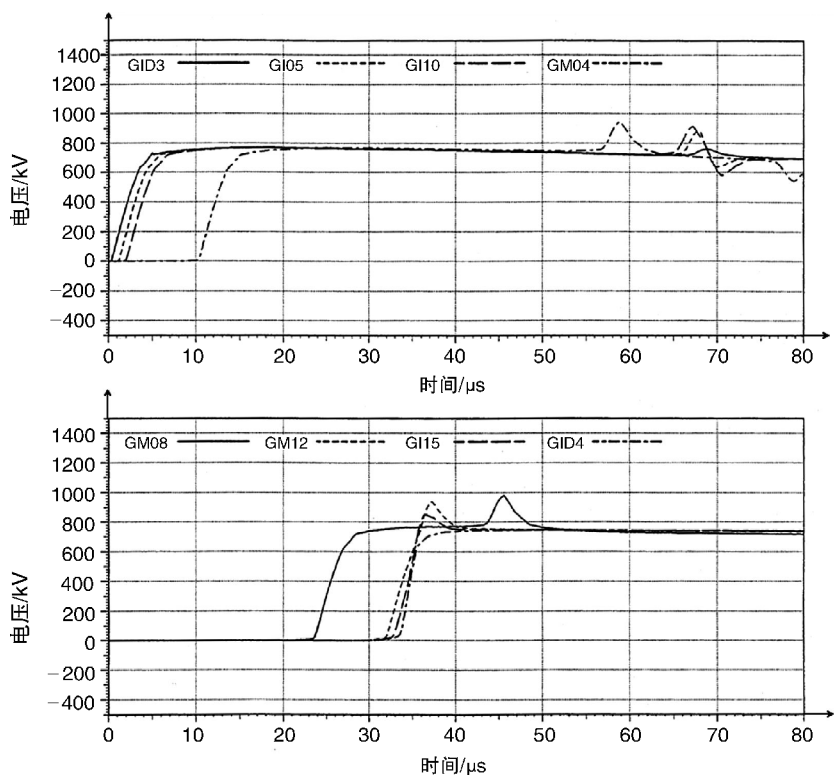


图 4.6 10km 长的 GIL 的过电压的波形

2^[222] 考虑安全系数 $K_s = 1.15$ ，其耐压水平

$$U_w \gg 1.15 U_{LEmax}$$

(在此， $1.15 U_{LEmax}$ = 最大过电压强度的计算值) 需要根据试验来校验。

型式试验 (设计试验)

现场试验的电压，在另一方面来说，经过型式试验的 GIL 的现场试验的电压是 80% 的雷电冲击耐压 U_{rw} 。根据 IEC 标准，允许现场试验有一次闪络但闪络后 GIL 可自恢复绝缘而通过试验。

4.10.4 规定的试验电压

规定的试验电压取决于避雷器的应用和线路的运行模式。

根据上述的试验过程的结果，下表列出了 400kV GIL 的现场试验电压和最大的允许过电压。

设计电压 U_{rw}	现场试验电压 U_w	最大过电压水平 U_{LEmax}
1425kV	1140kV	$\leq 990kV$
1300kV	1040kV	$\leq 904kV$

按照过电压的计算结果和过电压保护所提供的测量值，400kV GIL 的型式试验

中的雷电冲击水平可按下列值选取：

- 1km 长度的 GIL：运行模式：输电和开放末端（见表 4. 12）

过电压保护方式：2 组集成式避雷器（GI00 和 GI20）和 2 组安装在铁塔 L1 和 R1 上的外置式避雷器（MAA1 和 MAA2）

所需的雷电冲击水平：1425kV

- 10km 长度的 GIL：运行模式：输电（见表 4. 13）

过电压保护方式：2 组集成式避雷器（GI00 和 GI20）和 2 组安装在铁塔 L1 和 R1 上的外置式避雷器（MAA1 和 MAA2）

所需的雷电冲击水平：1425kV

4 组集成式避雷器（GI00，GI20，GM01，GM11）

所需的雷电冲击水平：1300kV

- 10km 长度的 GIL：运行模式：开放末端（见表 4. 13）

过电压保护方式：4 组集成式避雷器（GI00，GI20，GM01，GM11）

所需的雷电冲击水平：1425kV

表 4. 12 取决于运行方式和避雷器数量的最大过电压能力——1km 长的 GIL

运行方式	避雷器的数量		在近区直接雷击的而引起的 最大过电压水平/kV	
	GIL	铁塔 L1/R1	N2（35kA）	N3（18kA）
输电	2	—	<u>1013</u>	<u>9 1 3</u>
	2	2	<u>9 5 2</u>	890
开放末端	2	—	<u>1066</u>	<u>9 5 8</u>
	2	2	<u>9 8 9</u>	<u>9 3 8</u>

— > 990kV

-- > 904kV

表 4. 13 取决于运行方式和避雷器数量的最大过电压能力——10km 长的 GIL

运行方式	避雷器的数量		在近区直接雷击的而引起的 最大过电压水平/kV	
	GIL	铁塔 L1/R1	N2（35kV）	N3（18kA）
输电	2	—	<u>996</u>	904
	2	2	<u>983</u>	890
	4	—	867	837
	4	2	842	829
开放末端	2	—	<u>1048</u>	<u>9 5 0</u>
	2	2	<u>1035</u>	<u>9 4 0</u>
	4	—	902	883
	4	2	893	877

— > 990kV

-- > 904kV

4 组集成式避雷器 (GI00, GI20, GM01, GM11)

所需的雷电冲击水平: 1300kV^[91]

上述计算表明, 当安装额外的集成式避雷器, 可以保护 GIL 免遭过电压侵害并可以减小雷电冲击电压的水平。

4.10.5 计算数据的校验

型式试验结果

图 4.7 的试品是用来验证 GIL 的绝缘、动热冲击电流和耐电弧故障的能力。

型式试验的结果总结如下。

N₂/SF₆混合气体的绝缘能力已经经过了几十年的研究。虽然大多数试验结果是在小尺寸的产品上取得的, 但也说明了 N₂/SF₆混合气体的基本绝缘能力^[59]。由于可以达到 70% 的绝缘能力, 工业上可以使用 SF₆含量低于 20% 的混合气体。但是由于 SF₆含量在 0 ~ 10% 之间的混合气体的绝缘能力急剧增大, 混合气体中的 SF₆的最低含量必须大于 10%。

试品按 IEC 标准通过了雷电冲击和操作冲击试验。

试品成功地通过了大电流 (63kA) 的热稳定试验, 对于单相绝缘的 GIL, 这是同轴电场结构的 GIL 的基本要求。

内部故障的燃弧电流达到 63kA 的试验结果是: 对外部环境没有影响, 原因是没有发生电弧烧穿外壳的现象或仅是防爆膜破裂。主要原因是在燃弧期间电弧弧根分散了。

和纯 SF₆气体相比, 混合气体的灭弧能力降低了。由于没有电弧烧穿, 混合气体中的电弧特性在 GIL 中是一个优点。但对 GIS 和断路器来说, 由于混合气降低了开断性能, 这是混合气体的缺点^[59]。

长期带电试验的试验内容见表 4.14。

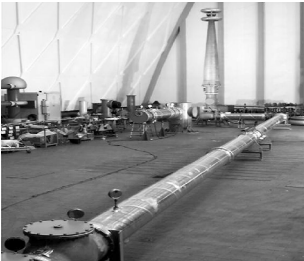


图 4.7 在西门子试验站的
420kV GIL 样机

表 4.14 长期带电试验的试验内容

• 为产品调试、再调试和最终试验的型式试验内容	
—含局放试验的 1min 工频耐压试验	630kV/1min
—操作冲击耐压	1050kV
—雷电冲击耐压	1300
• 长期带电试验的试验参数	
—7h 的工频电压试验	480kV
—5h 的热稳定电流试验	3200A
—每 480h 后的试验顺序: 操作冲击试验	1000kV

由于 GIL 是一个封闭的电气系统, 雷电冲击不会直接作用在导体上。这样, 采用安装在 GIL 末端的避雷器, 就可以减小雷电冲击。实际上, 在 GIL 上安装和 GIL 直接相连的, 称之为集成式的避雷器可以减小高频过电压^[37,61]。

4.11 系统控制

4.11.1 引言

在电网上运行的 GIL, 所需要的控制系统的功能为: 气体密度监视, 局部放电和温度的测量与监视。气体密度需要在 GIL 运行期间监视, 局部放电的测量仅需在调试时进行, 而温度的测量需要在母线特定的位置来监视是否发生过热现象^[60]。

4.11.2 气体密度监测

为测量气体密度, 可采用带温度补偿的压力表, 该表可在当气室密度到达设定的值时, 就发出报警信号。每一个气室的信号都可以送到主控室。

绝缘性能和管道内部的密度有关。气体的密度取决于温度和压力。实际上, 采用相同环境温度下的气体的体积来补偿所测的温度和密度。这就称之为“带温度补偿的压力表”。

测量结果可以传输到控制中心并将使用在自动控制系统中。压力值并不显示, 只是触点信号给出“气体泄漏报警”和“闭锁信号”。当密度值低于设定的值时, 通常是低于最低充气压力的 5% ~10%, 将发出气体泄漏报警。GIL 的气室的密度值有时设定在低于最低充气压力的 3% ~5%。

当气体密度低于安全的绝缘性能, 将发出第二级气体密度信号以用来闭锁线路。该值由设计决定, 通常是最低气体密度的 30% ~50% 的范围。当气体密度降到这一低值, 气室密度监视系统给控制中心发出信号来闭锁 GIL, 避免因低气压引起的内部闪络。

气体密度监视系统是 GIL 的持续监视系统以确保 GIL 的安全运行, 是控制系统的一部分。

4.11.3 局部放电监测

局部放电测量在 GIL 调试阶段现场高压试验时进行。这套连接内部天线的非常灵敏的系统可以探测内部的局部放电来保证整体的电气绝缘系统。

一旦现场调试试验全部顺利完成后, 可以断开局部放电测量系统^[207,208,213,214,215,219]。

40 多年的气体绝缘技术 (GIS 和 GIL) 证明, 一旦气室内部没有局部放电, 它就可以安全运行。仅有极个别的故障是和气体绝缘系统的内部局部放电的强度的增

长有关。一旦在高压试验过程中内部的局部放电现象消失,就不再需要对 GIL 进行持续的局部放电测量。

测量 GIL 内部电磁辐射的 UHF 天线将仍然安装在 GIL 中,只是外部测量系统在需要时进行连接。

4.11.4 温度测量

在 GIL 运行期间,由于外部的环境影响,GIL 可以有不同的发热区域。如道路下面的通道,较深的敷设要求,临时的覆土等原因都会产生较高温度的热区域。这些区域可在 GIL 路径的确定阶段加以识别,并采用外部的温度传感器来监控这些区域以避免 GIL 过热^[78,90]。

GIL 的设计和布置是按照最坏的运行情况来确定的。GIL 的最高运行温度是按照在隧道、廊道、地面上或直埋等运行方式来计算的。GIL 的热胀冷缩的计算要根据最大载荷,最高环境和土壤温度和可能的负载循环来进行。如环境条件没有变化,不需要进行持续的温度测量。只有当环境条件变化时,才需要控制 GIL 的内部和外部的温度。环境变化通常是大于预期的载荷或临时的过负荷。

4.11.5 GIL 监测总结

气体密度、局部放电和温度传感器的不同型式和功能的监测设备,连同电弧定位系统,都作为 GIL 的一整套监控系统,通常这套系统安放在主控室内^[111,165]。

图 4.8 示出了主控室内的 GIL 监控系统。两个三相 GIL 系统 6 根管道都有各自的监控传感器。气体密度压力表和温度传感器收集数据并通过数据通信总线“Modubus (LWL)”连接到控制中心。电弧定位单元 (ALC) 组成了局部放电测量和电弧定位系统。该信号先在 GIL 就地进行预处理,然后传输到控制中心。

气体密度压力表和温度传感器测量了每个气室的密度和压力值。气体密度压力表发出“气体密度的最低值”和“低气压闭锁值”的信号给数据采集计算机 S7-200。这些信号是 GIL 控制系统的一部分。测得的气体温度信号采用模拟测量数据传送给数据采集计算机 S7-200。温度值仅是告知数据并不对控制系统自动产生影响。这些数据通过采用光纤的 Modulebus 总线连到控制中心。

ALC 连接在输电线路的末端或 3~5km 距离的母线上,它可以精确定位内部故障。在输电线路和母线的末端都安装了两个 GPS 天线。依靠计算 GIL 内部电磁脉冲波的传输时间,可以精确地确定电弧的位置,精度高达 $\pm 25\text{m}$ 。这些数据也需要传输到控制中心。所有的传感器都连接到隔离单元上。

图 4.9 的物理原理图标明了监控传感器的位置。GIL 分成了若干个 1km 长的气室,这些气室通过隔离单元相互隔离。每一个气室都有自己的气体密度传感器并连接在一个数据总线上 (LWL)。电弧定位传感器也沿 GIL 分布,但所允许的最大间距为 3~5km。这些 ALU 传感器都连接在 Modulebus 总线上。

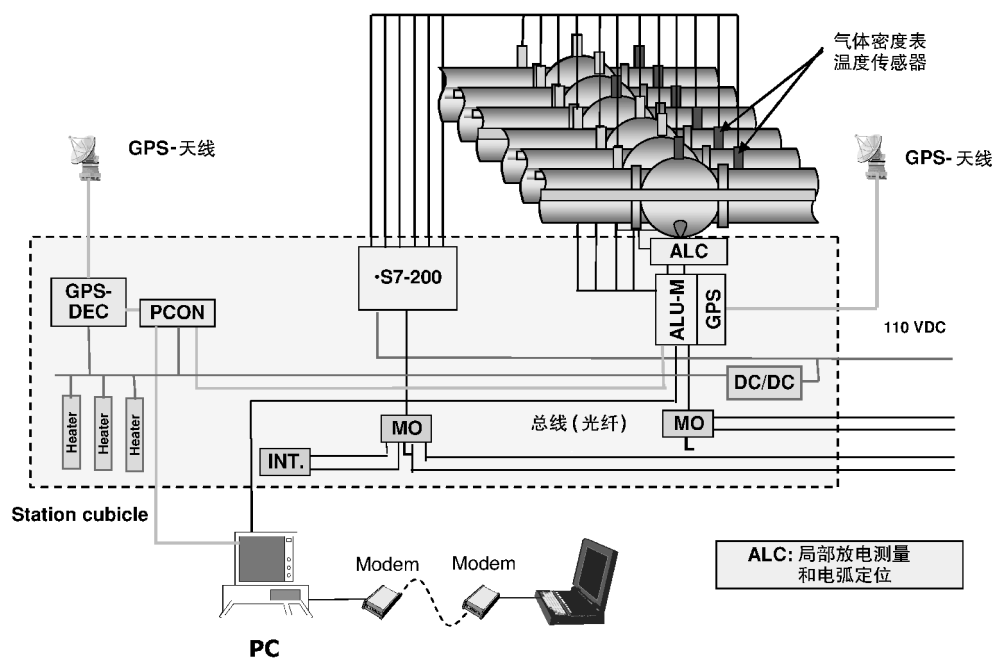


图 4.8 主控室内的 GIL 监控系统

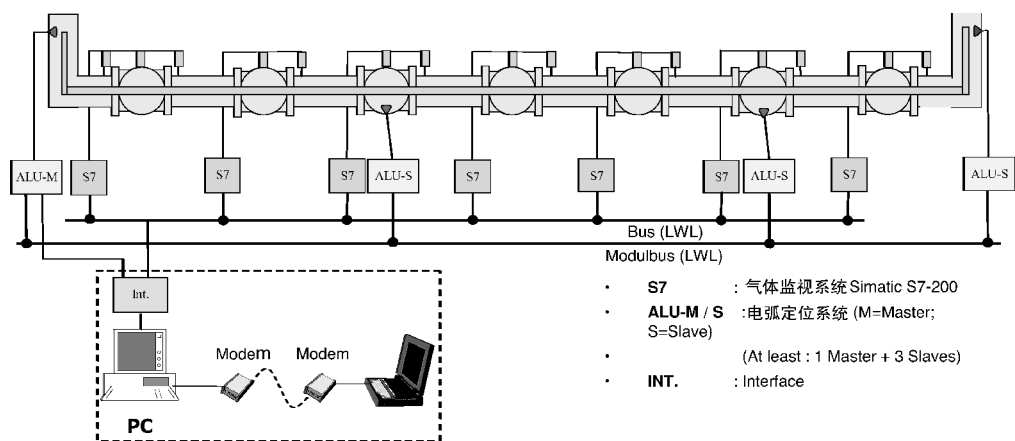


图 4.9 GIL 监控系统—物理系统概述

沿 GIL 的数据传输分成了两个数据总线。连接在每个气室的 ALC 的数据将通过 Modulebus 总线连接到控制中心里的接口计算机。每个气室上的密度和温度传感器所测的数据由数据总线收集并传送到控制中心的接口计算机。

第 5 章 环境的影响

5.1 概述

新输电线路对环境的影响很重要。公众的环保意识不断在提高，通过政府部门的调节越来越困难。视觉冲击、电磁场、施工现场的大小和周期、施工期间的运输、土壤发热的影响、绝缘气体的影响、材料的回收和全寿命周期的评估等，这些话题都和环境影响有关。但 GIL 在这些领域显示出了其优良特点。

公众对景观和自然资源的保护的敏感度在不断提高。在一些敏感的区域，如山区（欧洲的阿尔卑斯山地区）或沿海地区（德国的瓦登海沿岸），公众和政府很难接受架空线方案。这些地区的观光客对该地区新建的架空线将越来越敏感。在某些地区，甚至拆除现存的架空线，用道路下面的地下系统来代替（如丹麦）。对公众来说，采用地下输电系统可以提高该地区风景的美化程度，这些额外的花费由到这些地方来的游客提供了。另一方面，需要新的输电系统来解决输电网络的瓶颈。主要原因是现在越来越多的可再生能源进入输电网络。在一些敏感的区域，GIL 提供了经济和绿色生态的解决方案^[101,54]。

5.2 视觉冲击

隧道或廊道安装的 GIL 及直埋式 GIL，一旦安装后在电网中运行起来，它们在这些公共场合是看不见的。GIL 上面的土地仍然可以用于农业生产。但不适宜栽种大树，原因是一旦 GIL 需要维修，大树的根会妨碍进入。图 5.1 展示了不可见的 GIL 系统，有隧道安装的两个三相系统（图的中央部分）和 6 根单相的直埋式 GIL（图的左侧和右侧）。



图 5.1 不可见的 GIL 输电系统

5.3 电磁场

5.3.1 概述

电磁场是高压电气设备中基本的技术和物理基础。电气设备中需要对电磁场进

行技术和实际的管理以保证可靠的设备功能。所选的材料要在电场中具备可靠的长期稳定性，50 年或更多，这样才能保证昂贵的电气产品能够长期运行。制造商的产品研发以及众多科研单位和院校的研究都持续不断地涉及电磁场技术。这些研究成果都成文于各类出版物^[155-157]。本书仅关注 GIL 的电磁场和它的外部影响。

5.3.2 基本理论

进入电磁场的话题我们要用到许多的关键词和口号：风险、费用、环境、电磁污染、故障、辐射、注入、未来、健康、EMC 等。如果研究下去，这些关键词和口号还可以增加。为分类起见，把对设备的影响（电磁兼容性，EMC 表明系统和设备间的良好协调）和对人类的影响分开研究。我们对这些研究用数学表述出来就是麦克斯韦尔方程：

$$\operatorname{rot} \underline{H} = (k + j\omega\varepsilon) \underline{E} \tag{5.1}$$

$$\operatorname{rot} \underline{E} = -j\omega\mu \underline{H} \tag{5.2}$$

麦克斯韦尔方程描述了磁场 $\operatorname{rot} H$ 和电场 $\operatorname{rot} E$ 取决于频率 ω 、材料系数 ε 和 μ 以及耦合系数 k 。在低频阶段（如 50Hz），磁场和电场不会耦合，在高频阶段（如 100Hz），则会耦合。

在自然界，地球在南北极之间有连续的磁场，磁场强度约为 40μT。连续的电场存在于大气层，该值在有雷暴时是 20kV/m，晴朗天时是 0.5kV/m。自然界中的高频电磁场带来雷击（典型频率 200MHz），或者发光（波长 400nm），甚至宇宙中的辐射（波长 100nm）。人工和自然电磁场的频率如图 5.2 所示。

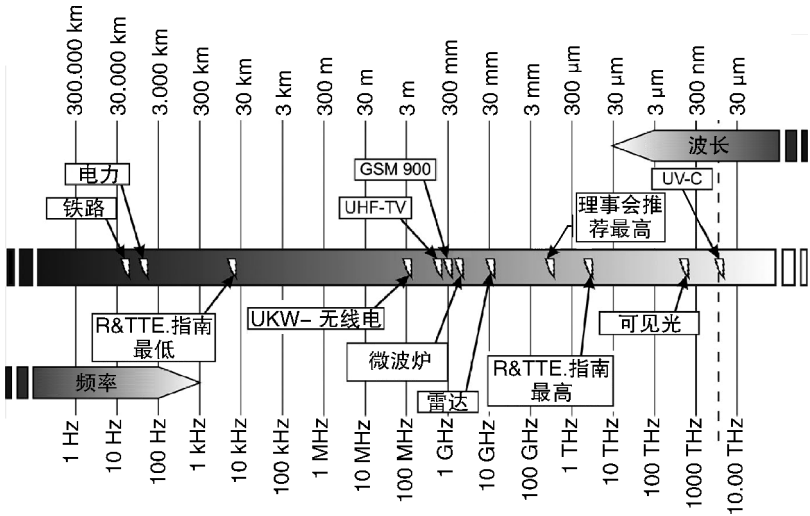


图 5.2 人工和自然电磁场的频率

磁场强度 H 的定义如下：

$$H = \frac{1}{2\pi r} [A/m] \tag{5.3}$$

磁场强度的公式说明了磁场 H 取决于电流 I ，半径 r 和常数 2π 。
磁通量 B 的定义如下：

$$B = \mu_0 H [\text{Vs/m}^2] \tag{5.4}$$

磁通量公式说明磁通量 B 取决于磁场 H 和磁导率常数 μ_0 。

单位 Vs/m^2 等于 1 特斯拉 (1T)[⊖]。下面的例子说明了这个数据的大小的感受。
距离一个带有 100A 电流的导体 10m 的位置，磁场强度 $H = 1.59\text{A/m}$ ，磁通量是 $B = 2\mu\text{T}$ 。本例中，磁通量随距离的远近呈线性衰减。但在三相系统中，该衰减由于三相导体的位置有更多的影响。

由于三相电场的 120° 的分布，取决于导体的间距，磁通量的衰减比单相系统要高很多。在典型的三角布置的电缆中，衰减随距离的二次方 r^2 而变化。另一方面，三角型布置的电场，由于它们之间发热限制，也减少了电缆的传输能力。如果电缆之间距离近，它们会互相加热。

电场强度 E 的计算公式如下：

$$E = \frac{Q'}{2\pi\epsilon r} [\text{V/m}] \tag{5.5}$$

电场强度公式说明了每单位长度的电荷量 Q' 取决于电场半径和介电常数 ϵ 。
每单位长度的电荷量 Q' 为

$$Q' = C' U \tag{5.6}$$

每单位长度的电荷 Q' 取决于电压 U 和每单位长度的电容 C' 。

只有当没有电场屏蔽情况下才可以测量电场强度（如架空线、无线电发射器等）。在有屏蔽的系统中，如电缆和气体绝缘母线，其外部的电场为零 ($E = 0$)。电场屏蔽层是电缆的屏蔽、接地的金属外壳（如变压器、GIL、GIS）或建筑物的钢结构。

为保护人类不受电磁辐射的影响，各国和国际组织都规定了技术措施、规定和标准，如图 5.3 所示。

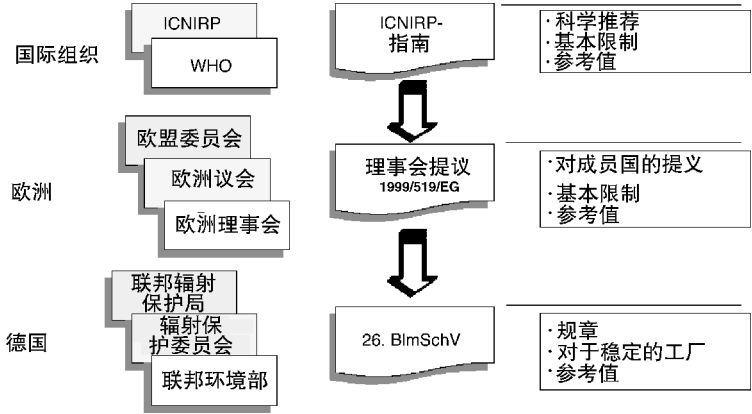


图 5.3 颁布人类保护限值规定的组织

⊖ 某些国家仍在使用非国际标准单位高斯 (G)， $1\text{G} = 10^{-4}\text{T}$ 。

公众对电磁辐射的敏感程度比以前高了很多。近些年来，电磁场问题成了很担忧的问题，而且这种担忧越来越强。尼古拉·特斯拉（Nicola Tesla）于1880年发现高频电磁波可以温暖人体（第一台微波炉的原理）。海因里希·赫兹（Heinrich Hertz）于1890发现电磁波，詹姆斯·克拉克·麦克斯韦（James Clerk Maxwell）在1873年就对电磁波进行了数学演算。几乎用了100年的时间，德国颁布了第一个标准——VDC0848^[158]，规定了特定条件下（仅对维修人员，短期，长期和公众）的最大电场和磁场的数值。现在，我们已有了欧洲的、国际的标准和各国的法规。其趋势是各种状况下所允许的最大值都在减小^[159]。

5.3.3 最大场强

最大电场和磁场的场强取值，要考虑公式中各种物理值的影响，及生物值，如人体中的电流密度（ J [A/m²]）或者所规定的吸收速率（SAR [W/kJ]）。还有发生在人类身体上的各类障碍，如反应能力、异常、神经功能性障碍或者统计计算上的流行病调查等^[36,61,159]。

按照能导致疾病或者畸形的数值来确定极限值。这里需要规定一个安全裕度。然后，考虑到现场的类型和人体暴露的时间，来确定一个参考值。例如，人体中电流密度的确定，能导致疾病或不良反应的最小值是100mA/m²。考虑到短时的暴露，该值需除以10，然后考虑到公众的暴露，再除以5，这样，得到基本值为2mA/m²。

该方法现在已给出了广泛的说明。在德国，现在极限值按照《26. 联邦污染防治法实施条例（26. BIm SchV）》^[161]规定的值是

$$B = 100\mu\text{T} \text{ (50Hz)}; E = 5\text{kV/m}$$

该值适用于架空线、电缆和变电站。

在瑞士，其标准《非电离辐射防护条例（NISV）》^[162]在1999年12月23日规定的磁场（50Hz）的极限值为

$$B = 100\mu\text{T}$$

告警值（50Hz）为

$$B = 1\mu\text{T}$$

告警值是针对有公众进入和有居民的建筑物、儿童运动场或所有公众能进入的场地。

在意大利，在1999年的法律中规定了对专业人士和公众保护的极限值是极限值（50Hz）

$$B = 100\mu\text{T}$$

告警值（50Hz）

$$B = 0.5\mu\text{T} \text{ (年平均值)}$$

$$B = 2.0\mu\text{T} \text{ (最长暴露时间0.1s)}$$

目标值 (50Hz)

$$B = 0.2 \mu\text{T} \text{ (年平均值)}$$

上述三个例子充分说明了电磁场极限值的趋势。它们反映出公众的敏感程度和对技术设备带来额外风险的不接受态度。公众的担忧可以通过国家制定的法律来表达。即使增加预算，来自公众的压力也要求很低的户外电磁场。

5.3.4 计算

目前高压输电有三种型式：

- 1) 架空线 (OHL)；
- 2) 电缆；
- 3) 气体绝缘输电线路 (GIL)。

最常见的形式是安装了数万千米的架空线。按照安装成本，架空线的成本是最低的。一旦不能采用架空线（通常在市区）就采用电缆，或者有更大的输送能力的需要，就采用 GIL。

过去，在项目论证期间，几乎不考虑电磁场的影响而得以通过。这在今天已经发生变化，电磁场在输电线路的评价中是一个重要的因素。

架空线产生大面积和高数值的磁场，如图 5.4 所示。架空线的额定电压是 400kV，两段连接了两个 1000MVA 的系统。这相当于架空线的额定电流是 1450A。这种情况下，甚至离输电铁塔距离 50m 的磁通量密度 B 都是 $3\mu\text{T}$ ，按照瑞士和意大利的标准的要求，该值太高了。按照瑞士和意大利的要求，安全距离要求几百米。

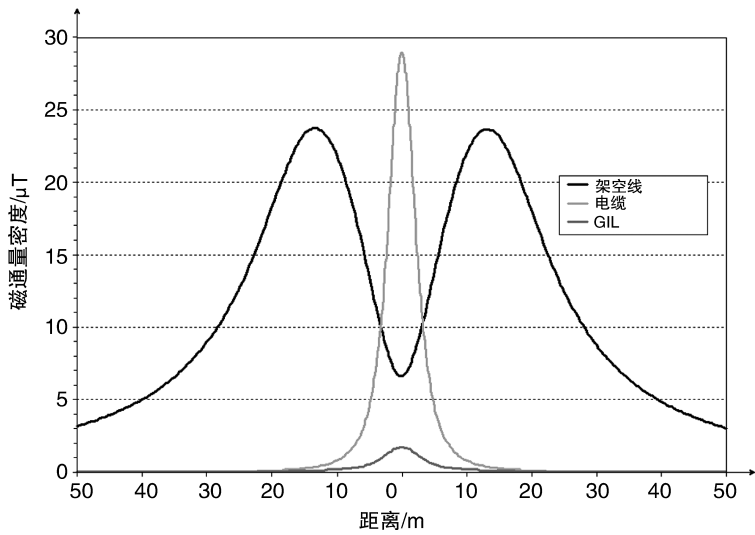


图 5.4 架空线、电缆和 GIL 的磁通量密度的对比

产生电磁场绝对值最高的是电缆。但若电缆彼此平行安装，三相电缆安装的形式可以减小磁通量密度。该限定值取决于电流的热效应，不会使电缆发热。

产生电磁场最低值的产品是 GIL。主要的原因是 GIL 运行时，有着完整的接地系统。低阻抗的外壳上可以产生感应电流，该反向电流（和导体上的电流有 180° 的反向）相当于导体上流经的电流的 99%。只有不到 1% 的额定电流可以在 GIL 外部测量到。大截面积的外壳和导体和低阻抗产生很低的阻性损耗。这说明没有热影响。

今后的输电项目，磁场问题将起更重要的作用。架空线系统将仅用于足够远的距离来满足传输功率。

5.3.5 外壳感应反向电流

和其他交流输电技术相比，GIL 有着显著的优势，就是 GIL 外面的电磁场非常低。原因是有着可靠接地的外壳和很低阻抗的外壳管。感应原理在外壳产生感应电压，该电压产生电流。由于外壳材料的阻抗很低，该电流几乎和流经导体的电流一样大。感应原理说明了感应电流是和原来的电流方向相反，并且重叠的电流所产生的剩余电磁场非常低。由于有着可靠接地的外壳，其电场是零。

图 5.5 说明了感应电流的电气原理。

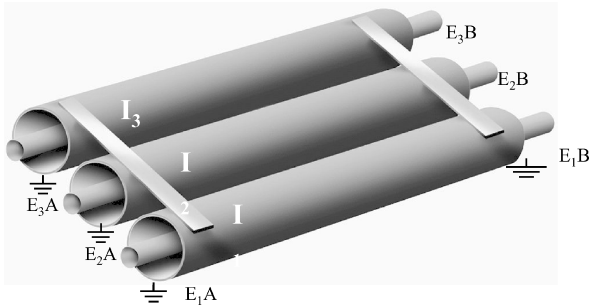


图 5.5 外壳上所感应的反相电流形成的原理

在 120° 相位变化的三相系统中，所感应的反相电流也是 120° 相位变化的。在相 1 上的电流 I_1 在相 1 外壳上产生了感应电流，该感应电流的相位按照 $d\Theta/dt$ ，和原来的电流 I_1 反相。由于 A 和 B 两末端的外壳连接，感应的反相电流回路是闭合的。感应电流 I_1' 的回路从 E_2A 到 E_2B 及 E_3A 到 E_3B 形成了闭合回路。对导体电流 I_2 和 I_3 ，其原理也是一样的，有着 120° 的相位变换和两相独立的闭合回路。

图 5.6 的电路原理图所示，对于导体的电流 I_1 ，其和外壳上感应回路上的反向电流 I_1' 的耦合关系是 1:1。

图 5.7 上的参数 K_1 是 I_1 和 I_1' 的耦合系数，通常选为 0.99。参数 K_θ 是相位角 φ 和 φ' 的耦合系数，通常选用 0.95 ~ 0.99。

较高的耦合系数，说明外壳上产生的反相电流的数值和导体上的电流一样大。两种电流是反相的（180°）。两种电流形成的磁场叠加所形成的最终的磁场的数值非常低，见图 5.4 的数值。

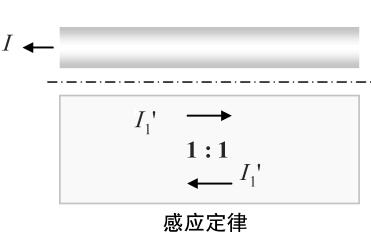


图 5.6 外壳上感应的反相电流的电路图

公式 (1): $I_1' = k_1 \cdot I_1$
 $k_1 = 0.99$

公式 (2): $\varphi_1' = k_\varphi \cdot 180^\circ$
 $k_\varphi = 0.95 - 0.99$

图 5.7 电流和相位角的耦合系数

5.3.6 GIL 的 EMF 测量

5.3.6.1 概述

测量 GIL 外部的电场和磁场，有着标准的测量程序，并有专用的设备。通过测量位于瑞士和德国的两处 GIL 安装现场，其电磁场的数值非常低^[32]。

5.3.6.2 德国施卢赫湖（Schluchsee）的 GIL 隧道

为验证位于德国施卢赫湖（Schluchsee）Cavern 抽水蓄能电厂的磁场水平，采用了计算和测量两种方式^[32]。作为计算的基础，测量了外壳上的感应电流。外壳都接地而且在末端连接在一起。所计算的外壳电流说明其数值和导体上的电流一样大，相位相差 180°。对于 GIL 外部的磁场，外壳的重叠布置和导体的电流，给出了结果值。由于 180°的相位差给出的磁场，其数值非常低，只有内部导体的磁场水平的 5% ~ 9%。

用罗氏线圈（Rogowski coils）测量出的这些数值验证了计算结果。计算结果包括了导体和外壳的几何形状及电流的数值和相位角。

对于有着对称 700A 负荷的两个三相 GIL 系统，计算出的隧道中间人员通道的磁场感应是 25μT。为验证这个计算结果，在 Cavern 电厂的抽水工况的额定功率下测量了其磁场。为了计算的有效值，采用了 DIN VDE0848 - 1 标准^[158]。图 5.8 上显示了磁场感应的计算结果。

隧道中间的人员通道的磁场，计算结果和测量值的差距小于 20%。计算值和测量结果的差距较大的点位于隧道的较低的区域，该区域的低压辅助回路的电缆影响了测量值。并且，隧道内的钢结构对磁场测量精确性也有影响。钢结构对电磁感应的影响非常大。第三个原因是电缆屏蔽层、接地线和所连的钢结构。实际隧道中的所有这些因素都是非常复杂的，难以完全用计算来模拟，这就是计算值和测量结果相差的原因。总之，这就是说，隧道中间的人员通道中的磁场的极限是 100μT，是 25μT 的 4 倍。

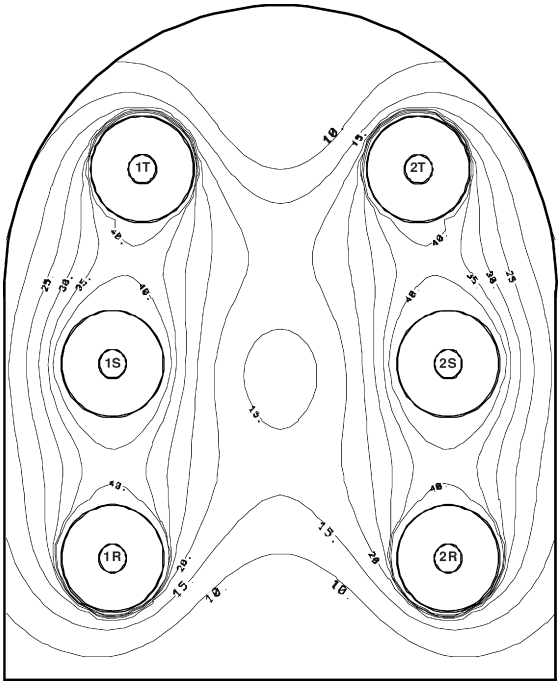


图 5.8 磁场感应的计算结果

当该电厂处于抽水运行工况时有稳定的电流时进行了电磁场的测量。GIL 输送的稳定电流为 700A。

用罗氏线圈（Rogowski coil）测量了电流，该线圈直接套在了 GIL 的外壳上。由于罗氏线圈采用测量级测量电流，这样有着较高的测量精度。

在隧道内每 20cm×30cm 的坐标方格测量了磁通量。采用在三个垂直方向上布置的传感器，测量了磁通量。在图 5.9 上的 x ， y ， z 分量上磁通量单位是 r. m. s。所计算的公式是：

$$B_{\text{eff}} = \sqrt{B_{X,\text{eff}}^2 + B_{Y,\text{eff}}^2 + B_{Z,\text{eff}}^2} \tag{5.7}$$

在隧道中和 GIL 管道之间都进行了磁通密度测量。隧道中人员通道间的最高值是 $20\mu\text{T}^{[32]}$ 。

测量值和计算值的对比 在表 5.1 和表 5.2 中对比了测量值和计算值。

罗氏线圈测量的电流和计算结果非常接近。见图 5.10 中的对比结果。

这些差别和隧道中的其他电流的影响有关。如人员通道下面有 6kV 的电缆，在隧道顶部装有 400V 的电缆，这些差别都比较小。同样小的差别见磁通量的测量结果和计算值的比较。其误差小于 10%。

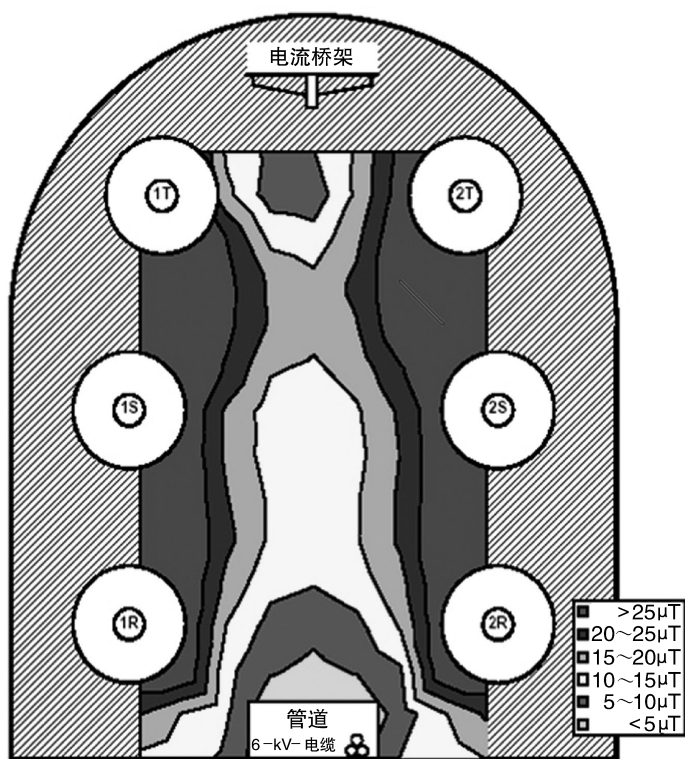


图 5.9 隧道中的磁通量密度

表 5.1 电流 700A 下的计算值和测量结果的比较

线路	相数	计算值/A	测量结果/A	差值/A
1	1	40.2	49.4	+9.2
	2	61.0	60.3	-0.7
	3	40.4	38.9	-1.5
2	1	40.2	50.1	+9.9
	2	61.0	61.5	+0.5
	3	40.4	50.8	+10.4

表 5.2 电流 700A 下的外壳上的感应电流的计算值

线路	相数	电流值	相位角	差值
		/A	(°)	/A
1	1	40.2	49.4	+9.2
	2	61.0	60.3	-0.7
	3	40.4	38.9	-1.5
2	1	40.2	50.1	+9.9
	2	61.0	61.5	+0.5
	3	40.4	50.8	+10.4

讨论和结果 测量结果和目前要求的最大磁通密度 100μT 相比，即便在隧道

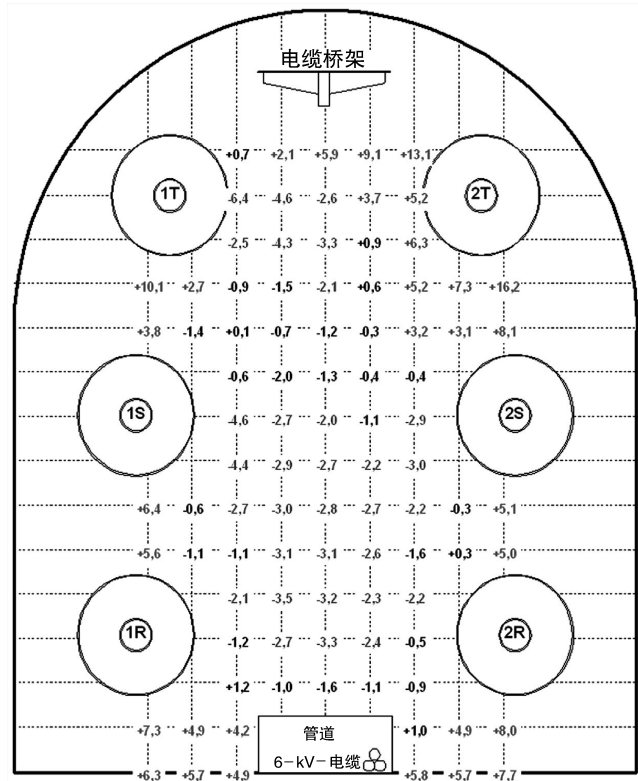


图 5.10 700A 电流下的计算值和测量结果的对比

内也满足 GIL 的应用^[159]。在距离直埋式或隧道形式安装的 GIL10m 远的地方，当 GIL 的运行电流是 3150A 时，也能满足现时瑞士 ($1\mu\text{T}$)^[36]和意大利 ($0.3\mu\text{T}$) 非常低的要求。

在隧道中测量的 GIL 的数值也表明，采用 NETOMAC 软件^[121]计算的数据也是相当精确的，其差距小于 10%。这就说明导体和外壳的耦合的模式正确性。也证明了一些 100m 长的 GIL 中的导体和外壳有着良好的耦合。耦合回路的低阻抗性可以在外壳上产生较高的反相电流。隧道外的电磁场，离直埋式 GIL 几米远的区域，按照新建项目在意大利和瑞士的要求，都低于 $0.3\mu\text{T}$ ^[157]。

5.3.6.3 瑞士日内瓦的 GIL 隧道

由于靠近机场和机场附近的 PALEXPO 博览会的大厅，位于日内瓦机场附近的 GIL 有着非常低的电磁场。在位于 GIL 隧道上方的建筑物的底层的 5m 的距离，测得的最大磁通密度仅 $1\mu\text{T}$ 。图 5.11 上显示了额定电压和电流下的测量值和计算值。

电场 外壳已可靠接地，因此为零。隧道中的每个钢结构组成了可靠的接地系统并连接到隧道的地网。该接地系统对工频电压甚至高频的暂态电压都有效。

对日内瓦的 PALEXPO 博览会的两个 GIL 系统运行在 $2 \times 190\text{A}$ 的工况进行了测量。根据测量结果，计算了在 $2 \times 1000\text{A}$ 的负载下的电磁感应。隧道中两路 GIL 系

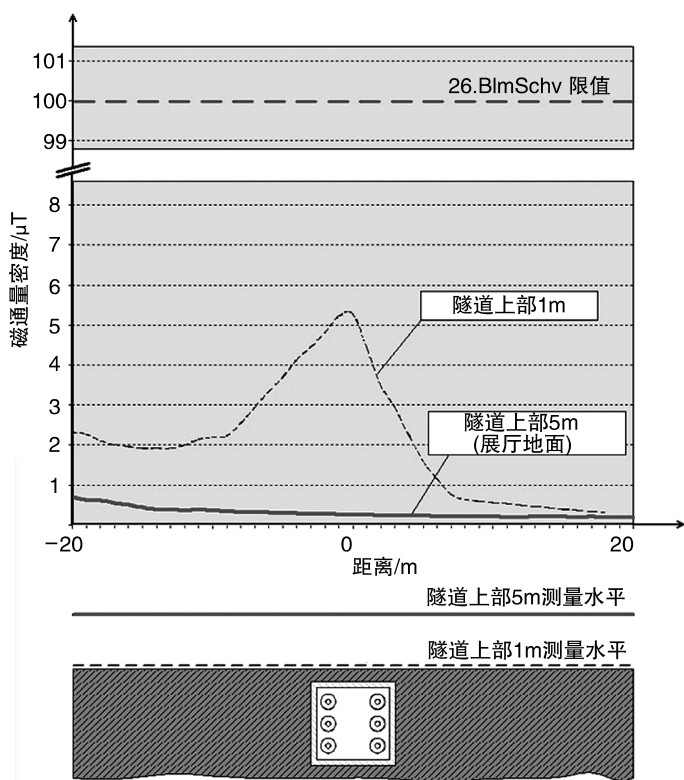


图 5.11 日内瓦机场 GIL 隧道上方所测的磁通密度

统的最大的电磁感应达到了 $50\mu\text{T}$ 。

GIL 隧道内的磁场感应如图 5.12 所示。测量点距隧道上方 1~5m，相当于街道或展览中心大厅的过道。

展览大厅地面的电磁感应完全符合瑞士的有关持续暴露在磁场中的相关规定。距离隧道中心以上 1m 处的最大值是 $5.2\mu\text{T}$ 。隧道以上 5m 处的最大电磁感应是 $0.25\mu\text{T}$ 。该值仅是德国规定的极限值^[158]的 0.25% 和瑞士的新的标准的 25%。

计算值和测量结果说明，仅注意隧道中的 GIL 的电磁辐射是不够的。隧道中完整的 220kV 的输电系统的各部位都影响了隧道中的磁场。隧道中的接地线中的对称负载有来自 GIL 的感应电流。接地线的电流对隧道中的磁场有影响，包括连接电缆的屏蔽层，接地线和钢结构等，因此局部可能测到较高的值。为此，隧道左侧距离 20m 的地方的磁通密度有所增加，如图 5.12 所示。

总之，GIL 隧道上方测量的电磁场较低，完全满足运行人员的安全需要和瑞士法律所规定的小于 $1\mu\text{T}$ 的要求。测量结果也说明，系统中的其他结构，如接电线系统、平行安装的辅助电路和建筑结构，包括钢结构和钢筋混凝土，所带来的影响都必须考虑。

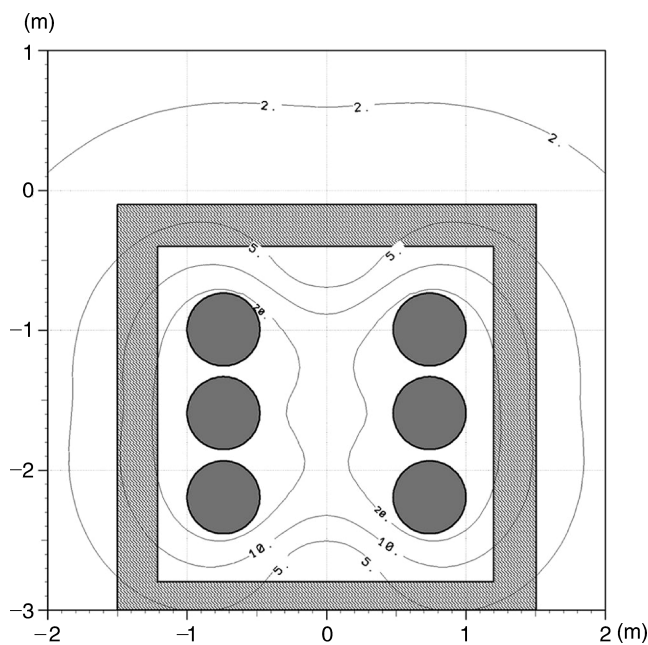


图 5.12 额定电流 $2 \times 1000\text{A}$ 下的瑞士日内瓦机场 PALEXPO 博览会 GIL 隧道上方测量的电磁感应

GIL 隧道上方的磁感应即使在 GIL 运行在满负荷下也可以忽略不计，同时也满足瑞士的标准。测量结果也说明，系统设计需要考虑接地系统所产生的电磁感应。所有的测量和计算结果也说明，GIL 的电磁感应要远小于类似功能的架空线和电缆^[32,159]。

5.3.7 直埋式 GIL

对于直埋式 GIL，GIL 附近的电磁场的计算和前面的一样。由于 GIL 位于地下 1m 的安装位置，对地距离较短。图 5.13 为 420kV GIL 在 3150A 电流下的计算结果。

较低的磁场位于直埋式 GIL 的上方小于 1m 处为 $10\mu\text{T}$ 。在 10m 距离以内，电流 3150A 时磁通密度小于 $0.3\mu\text{T}$ ^[32,159]。

5.4 气体处理

从环境角度来看，气体处理是重要的一方面。使用温室气体 SF_6 作为绝缘气体，需要每一步都进行非常严格的封闭循环的气体处理。按 3.9 节的要求，从第一次气体充入、维修和寿命末期的解体，这些绝缘气体都必须封闭在容器中，不得泄

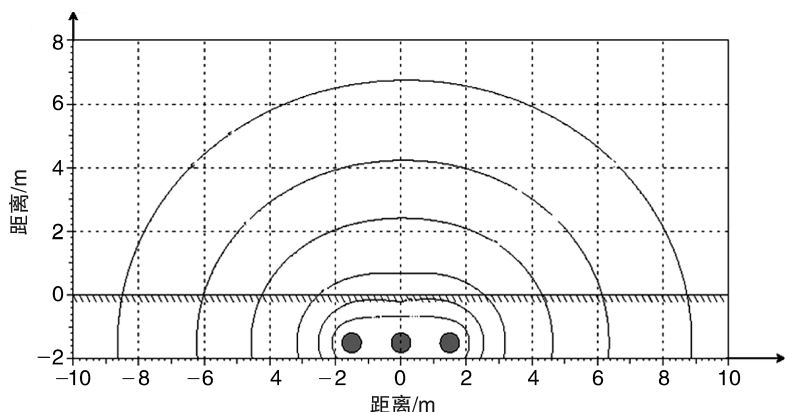


图 5.13 直埋式 GIL 在 3150A 下的磁通量密度的分布

露。IEC 标准的中的气体处理的标准 62271—303 和 62271—4^[51,58]中都规定了详细的气体处理要求和步骤。封闭式气体处理的概念也包含在设备的全寿命周期和寿命周期评估的一部分。

5.5 热影响

GIL 无论安装在隧道或直埋，当有电流通过时，都会产生热量。在项目规划阶段需要研究每个项目的热量传输以避免温升超过极限值。为避免负面的影响，按土壤的要求给出了限定值，例如，不可逆转的土壤干燥或对土壤中植物的影响。第 3.7 节给出了各种敷设形式的热影响的设计标准。

5.6 回收

对于好的生态学观点，循环利用是一个重要的方面。GIL 在寿命的末期很容易进行拆解。GIL 上的不同的材料，如铝管、绝缘子或气体，都设计成可以拆解的，并可以回收。

GIL 的主要元件是：

- 1) 铝管；
- 2) N_2 或 SF_6 绝缘气体；
- 3) 浇注的环氧树脂；
- 4) 防腐涂层（对于直埋式 GIL）；
- 5) 隧道或竖井中的钢结构。

GIL 使用的主要材料是外壳和导体的铝管（超过了 90%）。外壳的材料是铝镁合金，导体的材料是纯铝（纯度 99.5%，称为电气铝材）。隔离单元和转角模块的外壳是铸铝材料铝硅镁合金。GIL 的长度补偿单元由铝制或钢制的波纹管组成。这

些贵重材料的回收都由铝管或铝板材料的生产厂家进行。

绝缘子由环氧树脂浇注并且很容易拆开。因为对材料的高纯度要求，回收的环氧树脂就不能用于新的绝缘子，但它可以用作其他塑料制品。

回收后的气体可以储存在容器中，并送回到气体工厂中，再处理成新的气体。

外壳上涂覆的防腐材料，需要在回收后进行剥离。这可以在涂覆材料的工厂中进行。

钢结构可以拆除并回收后用于新的钢制品。

总之，GIL 的回收过程是一个较为容易的步骤，因为各种不同的材料都能按照不同的处理程序进行处理。

5.7 全寿命周期评价

从生态学的角度来看，对长距离运行的 GIL 的安装需要进行全寿命周期的评价。对于大容量长距离输电的 GIL 来说，高昂的安装费和很低的线路损耗应该平均到 GIL 的长期运行寿命中去^[202]。

对生态系统的影响只发生一次，一旦超过 50 年或更长就不再考虑了。于 1974 年安装在德国黑森林地区的最早的 GIL，到现在仍在运行，没有任何老化的迹象。

全寿命周期的评价考虑了系统从制造、运行到拆解的全过程的所有因素的影响。这种对比可以转化成碳足迹。这就意味着任何能源可用来生产原材料，运行输电线路并拆解和回收设备。有关碳足迹的说明，见第 5.8 节。

5.8 碳足迹

碳足迹是一个合理的评价方法，用来对比和评价涉及全球变暖的技术。凭借着较低的线损，GIL 在长距离大容量的输电传输中，有着潜在的减少碳足迹的优势。在 400kV，大电流 3150A，其线损小于每千米 0.01%。在 800kV 的输电线路的线损仅为 400kV 的线路上相同输电容量 400kV 线路的线损的 1/4。线损的减少就意味着对减少碳足迹做出了贡献。

电压越高，线路的线损就越低。对于长距离输电，采用 800kV，甚至 1000kV 的运行电压。为连接远离负荷中心的可再生能源的基地（风电在北方，太阳能在南方），超高压输电扮演了一个重要角色，并且 GIL 提供了更好的解决方案。不仅 GIL 输电线路的较低的线损贡献了减少碳足迹，而且再生能源可以连接到电网上同样也减少了碳足迹。

对于 GIL 上 CO₂ 的已有所研究，并取得了下列成果^[202]。

按照 ISO 14040 的要求，进行了全寿命周期的评估和评价。全寿命周期的资产分析（LCI）需要分析产品在全寿命周期内所使用的材料和消耗的能源。研究的目

的就是要确定长距离使用的 GIL 在其全寿命周期内的 CO₂排放的影响，包括建设和制造过程中。甚至要研究 GIL 密封失效的可能性，以及泄漏到大气中的 SF₆。图 5.14 ~图 5.16 是 1000MVA、2000MVA 和 3000MVA 下运行的 GIL 的 CO₂贡献。

图 5.14 ~图 5.16 表明外壳直径为 500mm 的 GIL 分别运行在 1000MVA、2000MVA 和 3000MVA 的传输功率下的分析结果。

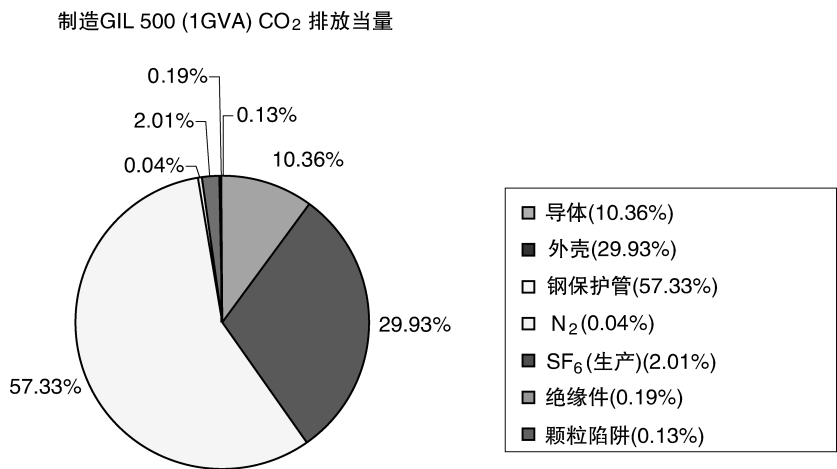


图 5.14 CO₂贡献的分布图：1000MVA 输送容量的 GIL

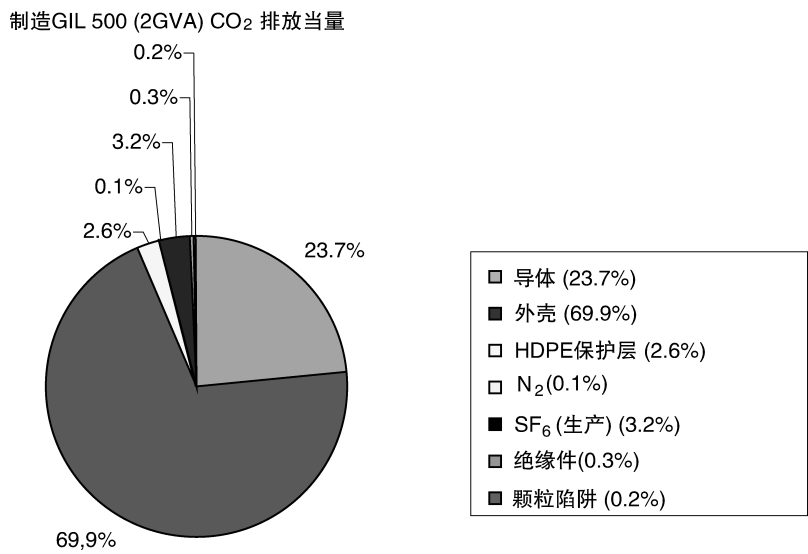


图 5.15 CO₂贡献的分布图：2000MVA 输送容量的 GIL

在两种情况下，外壳制造过程占了大部分的碳足迹，分别是 57.33% 和 69.9%。如果加上 29.93% 和 23.7% 的导体，90% 以上的碳足迹来自铝管制造

环节。

在直径为 600mm 的 GIL 下，外壳的碳足迹是 56.9%，导体的是 36.4%，二者占了 90% 以上。

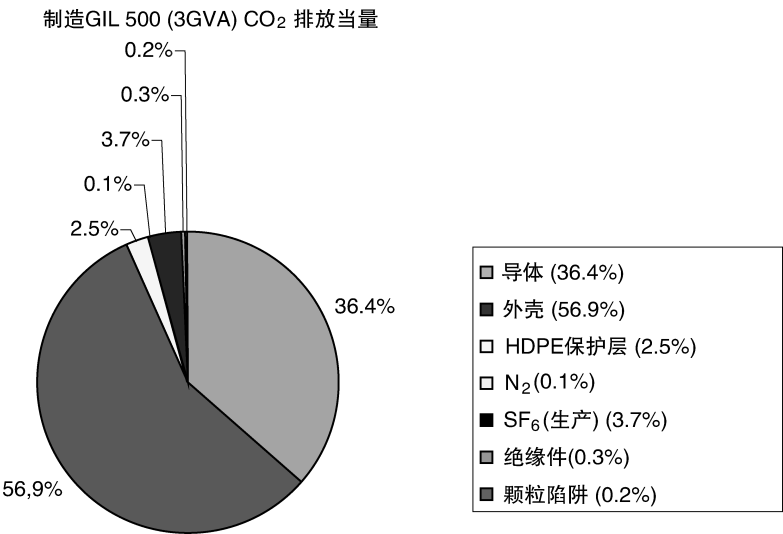


图 5.16 CO₂ 贡献的分布图：3000MVA 输送容量的 GIL

CO ₂ 贡献种类	1000MVA	2000MVA	3000MVA
制造阶段	3.78%	2.00%	1.52%
线路损耗	89.60%	95.50%	96.31%
SF ₆ 泄漏	6.62%	2.50%	2.17%

令人吃惊的是，SF₆的贡献相当低，其值在直径为 500mm 负荷为 1000MVA 的 GIL 为 4.5%，而在直径 800mm 负荷为 2000MVA 的 GIL 为 3.2%。绝缘子占碳足迹的 0.3%，这是一个相当低的碳足迹。

通过对 1000MVA、2000MVA 和 3000MVA 负荷 GIL 运行损耗和碳足迹的比较，可以看出，和制造相关的碳足迹相当低（见图 5.17）。

传输容量越高，制造过程中的碳足迹就越低，从 1000MVA 中占 3.78%，到 2000MVA 中占 2.00%，再到 3000MVA 中占 1.52%。绝大部分的碳足迹来自线路的损耗，在 1000MVA 中占 89.6%，2000MVA 中占 95.5%，在 3000MVA 中占 96.3%。

需强调的是，与 SF₆ 气体泄漏的有关的碳足迹相当低，在 1000MVA 中只占 6.6%，在 2000MVA 中占 2.5%，在 3000MVA 中占 2.17%。

总之，可以这样说，最低的线路损耗的输电系统才能达到最低的 CO₂ 贡献。

CO ₂ 排放种类	1 000 MVA	2000 MVA	3000 MVA
制造	3.78%	2.00%	1.52%
线损	89.60%	95.50%	96.31%
SF ₆ 泄漏	6.62%	2.50%	2.17%

图 5.17 对于负荷为 1000MVA、2000MVA 和 3000MVA 的 GIL 的碳足迹

第 6 章 经济方面

6.1 概述

气体绝缘输电线路是建设费用很高的长期投资。投资时间长并持续运行数十年。1974 年在一个抽水蓄能电站安装的第一套 400kV GIL 至今还在运行，安全运行已超过了 36 年，至今没有需要大的维修。在世界各地运行的许多项目都有同样良好的运行经验。

对于 GIL，产品的建设初始投资是较高的，但运行成本（主要是线路的损耗）是较低的。按照每千瓦时来计算电力的输送能力，电力输送能力越高，带来的电网的收入也越高。所以 GIL 的投资在未来可以是有着长期的回报。为什么说 GIL 是有着良好的投资价值，主要是 GIL 可以将大型的可再生能源通过地下输电系统输送到负荷中心。

本章将说明不同的经济影响方面，并给出了对特定方面减少费用的措施^[220]。

6.2 材料成本

对于大型输电系统，GIL 的建设费用是一笔很大的投资。建设费用的很大部分都是来自于铝管和铝导体。绝缘件占 GIL 的成本不大，只占 GIL 的全部成本的 0.5%，主要是因为所需绝缘件的数量不多。

隔离单元和转角模块只需在长距离 1 ~ 1.5km 的直线方向上配置。这样，这些材料的价值只占 GIL 总体价值的很小一部分。总之，GIL 的材料成本占了整个项目成本的 40%。

其次大的成本来自 GIL 的敷设和安装的过程：如现场预组装、现场运输、廊道内的放置或运输到隧道中、连接部分的焊接、钢结构的固定、现场的高压试验和调试等。这些部分占了整个项目成本的 40%。

最少的成本部分是工程设计、项目规划、计算、工程管理和项目前期、执行中和安装后的各种研究。这些费用占了整个项目的投资的 20%。GIL 项目的成本组成如图 6.1 所示。

再来详细分析材料的成本。铝管占据了成本的最大的份额。份额大的原因很简单，就是铝管的数量大和高质量的加工要求。

铝制品的用量可以按重量的千克数来计算。铝管的重量取决于管材的直径大小

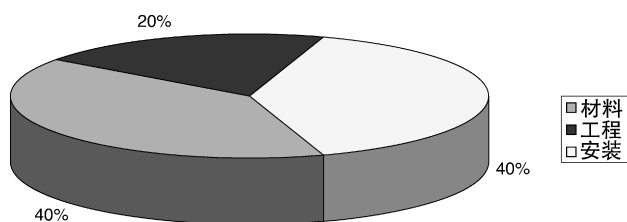


图 6.1 GIL 项目的成本构成

和壁厚。管材的直径又取决于额定电压下的 GIL 的外壳和内部导体的直径，见 3.2 节所陈述的。管材的壁厚参数直接决定了所涉及项目的承载电流的大小。外壳的直径是由运行的电压的水平来决定，如 420kV 的 GIL 的直径是 500mm，800kV 的是 630mm。取决于每个系统的传输功率，420kV GIL 的传输能力是 3000MW，800kV GIL 的传输能力是 4000MW。按照传输容量可确定铝材的用量。

按照高电压设计要求所生产的铝管，其管材的直径和圆度的公差要求决定了生产工艺。如今，每年的 GIL 用量还是相对较低。在过去的 10 年的增长下，GIL 的用量为每年数万米。铝管用量相对低的结果就是，几乎所有的 GIL 的外壳都来自一家铝管供应商。一台螺旋焊管设备的最大生产能力是每年约 120km。也就是说设备仅利用了 10%，属于小批量生产和产能利用不足。随着 GIL 用量的增加，成本还可以降低。

可以预计（如果产能全部利用的话），铝外壳和导体管的制造成本将会降低。由于铝管的成本占据了 GIL 成本的大部分，这样的话将带来 GIL 成本的大范围的降低。预计对于制造阶段，成本降低 30% ~ 50% 是有可能的。

当 GIL 项目增多时，GIL 内部的绝缘子的需要量也很大。绝缘件对 GIL 成本的影响不大，产量提高也会带来成本的降低。生产 GIL 绝缘件的设备和 GIS 的一样，这样生产线就可以按 GIL 和 GIS 绝缘件来优化。若项目需要，绝缘件的产能就可以增大，并很容易扩充现有的生产设备来增加产量。

GIL 的绝缘气体是六氟化硫（ SF_6 ）和氮气（ N_2 ）。典型的混合气体是 80% 的 N_2 和 20% 的 SF_6 。和 SF_6 相比， N_2 的成本较低并且运用广泛。 SF_6 相对较贵，而且质量满足用于高电压产品的应用的仅在全球少数厂家生产。若 GIL 用量增加，每千米 GIL 的 SF_6 和 N_2 的数量很大，成本就会降低。

N_2 占据了混合气体的大部分，保证了较低的气体成本，而绝缘气体的成本仅占了 GIL 成本的很小部分。 N_2 在全球范围内都较为便宜。

隔离单元、补偿单元和转角模块都相对较昂贵，主要是它们都采用铝铸造壳体，补偿单元采用了特殊的钢材或铝合金。这些元件的应用完全取决于工程的需要和安装方案（直埋或在隧道中安装）。工程上弯曲的和转角的越多，成本也越高，这是成本高的来源。

对于标准的没有转角和补偿单元的直埋式 GIL, 隔离单元仅在 1000 ~ 1500m 的距离内设置, 这样, 隔离单元的成本几乎可以忽略不计。但对于短距离的线路上的隔离单元, 走向改变的转角模块和补偿单元, 这些元件的成本占主要部分。GIL 项目的走向路径对成本有着大的影响。隔离单元、转角模块和补偿单元都对特定项目的影响较大。因此, 采用优化方案的项目设计是非常重要的。

6.3 装配成本

GIL 的装配原理和管道类似, 在现场对满足运输长度的管道进行对接。GIL 的安装成本和现场条件的关系非常大, 管道的最大运输长度、转角模块的数量、设备安装的条件、施工环境和安装工的水平。这些条件在每个项目中都不同, 需要在项目中进行详细规划以最低的成本实现最优的装配工艺。以下是一些关键点:

最大运输长度 外壳和导体的最大运输长度取决于公路和铁路运输条件的限制。运输长度越长, 现场的连接工作就越少, 安装成本也越低。较长的管道将减少现场的焊接工作量。如运输极限是 10m, 1km 的 GIL 就需要 100 条焊缝; 如运输长度为 20m, 则需要 50 个焊缝。对于 3 相来说, 10m 管要 300 个焊缝, 而 20m 管则降到 150 个焊缝。每一个外壳和导体的连接需要 2 ~ 3 名工人工作 3 ~ 4h 来完成。很明显, 最大运输长度是影响项目成本的重要因素。

塑性弯曲 当 GIL 的路径需要适应地形需要时, 利用它的弹性弯曲性能是首选方案, 弯曲半径可以达到 400m。按照通常条件下 (没有山、沼泽或岩石地带) 管道的设计经验, 采用转角模块改变方向的能力要比 400m 的弹性弯曲改变方向大得多。但采用弹性弯曲改变方向可以节省工程费用。

转角模块比外壳和导体更为昂贵。转角模块的外壳采用铸铝合金, 并且一旦用于直埋式 GIL, 转角模块要求更加坚固以抵抗 GIL 的热膨胀的应力。这样的话, 就需要有更厚的外壳。为将转角模块连接到母线外壳上, 需要两个焊接单元模块。其中的一个可在工厂里面预组装, 另一个将在现场当母线安装在隧道中进行安装。很明显, 用了转角模块将造成 GIL 每千米的成本上升, 如果用了太多的转角模块项目的成本将变得很高。

现场的工作条件 现场的工作条件决定了安装的速度和整个项目的成本。可以根据所需要的设备和工人来优化项目的时间。这个优化需针对每个项目来进行, 因为每个项目的现场安装条件都是不同的。

原则上, 管材、绝缘子、触头系统、隔离单元和转角模块都需直接送到现场进行预组装。在沟渠隧道附近将这些材料进行预组装, 然后运进沟渠或隧道进行安装, 见 3.7 节的详细说明。在项目规划中对现场条件的解决方式对项目成本的影响很大。因此, 需要和用户进行紧密的合作。

现场工人的工作条件和要求 现场工人的工作条件和要求需要遵守工作地点的

法规和法律。安全规程、工作时间、倒班限制和健康准则都影响着整个项目的施工。所有这些都影响整个项目的施工时间，对整个项目的成本有着跟大的影响。

安装成本和每一个项目的关系都很大，这需要和当地的业主共同进行。每个项目的施工计划都是不同的，都有不同的成本。

6.4 线路损耗

线路损耗是电网运行成本的重要因素，见 4.3 节的说明。在 GIL 的全部寿命期间内，电流流经 GIL 时会产生热损耗，这种损耗会持续 50 年以上。以下通过 GIL 和架空线的线路损耗的对比来说明 GIL 的优势：

表 6.1 是架空线和 GIL 的线路损耗的对比。该值的计算是按照第 4.3 节的 2000MVA 的输送容量，相当于 3000A 的电流。对于 100km 长的线路，GIL 和架空线的线损相差 64MW。为计算这些损耗，每 kW · h 的价值按照 5 欧分来计算。计算下来，每年的费用是 27 520 000 欧元（大约占了 10% 的投资金额）。该计算是按照线路电阻的损耗来计算的。其他影响方面，如低的维修成本和高的可靠性，还未计算在内。另外，取得建造长距离地下输电线路的许可要容易一些。

对于 GIL 输电系统，线路损耗对于运行成本有着巨大的优势，可以节省大量的资金。或者，从其他角度来看，节省的线路损耗可以卖给末端用户。见 5.8 节的碳足迹。

表 6.1 架空线和 GIL 的线路损耗对比

		OHL（架空线）	GIL
输电量	MW	2000	2000
每米的线损	W/m	820	180
每百公里的线损	MW	82	18
GIL 和 OHL 的差值		Δ64	
每年的线损价值差别			
电费价格：(5Ct/kW · h) × 8600h × 64000kW		€ 27 520. 000	
对比：100km 的 GIL 的投资		€ 300 000. 000	

6.5 影响成本的因素

未来的输电系统需要将可再生能源通过长距离送到用户所在的负荷中心。建设这样一个输电系统的成本分析对系统的发展很关键。投资和成本需要按照全寿命周期来考虑。如安装成本、线路损耗、财务成本、长时间的项目审批成本和为了公众接受的成本等，这些都是要考虑的主要成本因素。

另一方面，未来的输电网络需要传输大容量（数十吉瓦）和长距离（数百千

米)的传输,这些都需要足够大的解决方式。只有对电网进行大的初始投资才能实现降低综合成本的要求。大多数的长距离输电可通过 400kV 或 800kV 或 1000kV 的架空线来实现。但是有些长的区间要采用地下输电的方式。在这种情况下, GIL 提供了一个价格高于架空线的解决方案。总成本是架空线和 GIL 的平均值。

采用 GIL 作为地下输电系统的主要优势在于,在一些区域,由于公众对电网运行的问题导致电网建设的延误,这样可再生能源就不能接入系统送到最终用户,会导致没有有效能源的供给并减少了可再生能源的装机量(如风电)。

最大的可再生能源来自于陆上风电或海上风电(如北海沿岸的能源估计有 300GW),还有来自于沙漠的太阳能(在 $500\text{km} \times 500\text{km}$ 的沙哈拉沙漠上潜在的太阳能就可以提供当今世界上所有的电能消耗)。如今世界上在可再生能源上的投资急速增长,如不断增长的风电(现今在建的 500MVA 和规划中的 1000MVA 的陆上和海上风电)和太阳能电站(在建的有 500MVA)。

现在所缺少的最后一环就是将这些能源从电源点输送到人口稠密区域、工业区、大都市区、相融合的国家以及发展中国家的输电线路的能力。如今的中国,各个输电系统采用大容量、长距离输电线路来输送 3GW、5GW、8GW 或 10GW 的电量到最终用户区。

用于解决地下输电问题的 GIL 初始投资高于架空线,但 GIL 可以实现输电工程,如果不用的话可再生能源就无法传输。这就需要对成本、主要是初始投资进行综合考虑并评价。

和铁路运输系统在世界上的发展一样。铁路系统在有着强大的国家投资计划的国家里发展得都非常好,开始于英国、德国、全欧洲、美国和后来的日本,如今铁路的建设都非常发达。高速公路系统也一样。由政府支持铁路和高速公路的初始投资,并给所有国家和公众带来益处。一个全新的全覆盖的电网,一个“超级电网”将对利用过去不接入电网的可再生能源起到关键作用。这就需要重新分析影响成本的因素并进行综合成本分析。无论如何,为了对 GIL 进行成本优化需要对影响成本的因素进行分析。影响 GIL 成本的因素有以下几项:

额定功率: 其中一个影响成本的因素是电网的传输能力。

架空线的投资最低, GIL 和电缆的投资较高。

对于电缆,强制冷却系统和双电缆或三电缆系统成本会增加。

对于 GIL,增加导体和外壳的壁厚带来了铝材的增加,成本会增加^[132]。

增加电网传输能力的首选方法是提高输电电压, GIL 已经用到 800kV 系统。一个 400kV 电压 2000MVA 的 GIL 系统,可以容易地采用加倍电压的方式将容量增加到 4000MVA。

线路规划 对现场装配有影响的各种障碍(跨越道路、岩石中的沟渠开挖、河流、湖泊等)都对输电项目的成本有很大的影响。在项目规划阶段,需要对线路进行优化以减少投资。

现场条件 为装配 GIL，施工现场需要能开进运输外壳和导体的车辆。这些材料虽然不重，但体积和长度都很大。现场需要有堆场来存放管材等其他材料，以保证现场安装的连续性。对于预组装，需要在安装场地附近搭建帐篷，用来对敷设前的 GIL 做准备工作。

螺旋焊管的制造 对于大型输电项目（如 100km 的长度），若管材的加工地能靠近现场，这将带来很大的成本节省。螺旋焊管设备只需要一个 20m × 40m 的棚子，每年可以生产 120km 的螺旋焊管。螺旋焊管的材料是铝板的卷材，对运输来说是很紧凑的。这个可能性也提供了一种节省项目成本的机会。

工人的水平 GIL 的装配需要工人的技术水平，这些工人可以来自世界各地或当地。经过几周的培训，众多的熟练工人可分成几班来进行现场施工。现场施工的全部时间对项目的总成本有主要影响。

第 7 章 GIL 的应用

7.1 概述

本章介绍了过去 40 年间世界范围内安装的一些典型应用。气体绝缘技术于 19 世纪 60 年代从麻省理工学院起始以来，在世界范围不同电压等级不同应用领域以及不同气象条件下都取得了成功的经验。如表 7.1 所示，已经有数百单相公里长的 GIL 安装于世界各地。

在输电网应用 GIL 的理由与人口密度、环境保护以及与基础设施的联系有关。

人口密度 在人口稠密地区空间有限，地价昂贵，公众反对意见强烈。在这种情况下架空线无法实现，部分情况下用 GIL，部分情况下用电缆。

环境保护 在环境保护地区架空线的应用很难得到批准。在一些情况下会用 GIL 或电缆等地下解决方案。

基础设施 GIL 的应用在多数情况下与基础设施建设有关，如水电站、核电站、燃气或燃油电厂、燃煤电厂等。这些基础设施项目中包含变电站，GIL 在这些基础设施用于连接高压系统的不同部分。

未来的应用领域会随交通等基础设施的建设项目而发展。这些基础设施项目为铁路、高速公路或运河，可以与用 GIL 的大容量输电线相结合。GIL 即使在内部故障情况下对周围设施也不构成危险，这样的完整安全性使得 GIL 可以与铁路、公路隧道、桥梁以及铁路和高速公路相结合^[136,154]。

表 7.1 2010 年全球 GIL 装运情况

电压等级/kV	单相长度/km
72/145/172	38
245/300	33
362	15
420	110
550	90
800	3
1200	1
合计	290

GIL 有三种基本敷设方式：直埋敷设、隧道敷设或地面构架敷设。地面构架敷设方法通常用于变电站或电厂内的应用，这些属于公众不允许进入的地方。如果 GIL 必须穿过公众允许进入的区域来进行高电压输电，那就必须是禁止公众进入的，只能是地下隧道安装或直埋安装。

在乡村宽阔地带直埋安装 GIL 是最经济也是最快的敷设方法，敷设技术是从管线敷设方法移植过来的，与输气以及输油管道敷设方法类似。隧道敷设技术主要用于都市地区，这些地区有许多街道和建筑等，现场施工的可进入性是有限的。如能提供更多可进入性，隧道也可以用预制混凝土段放入明沟再覆以 1~2m 的泥土来建成。在所有案例中都只用第 1 章所描述的标准单元。

对 GIL 的所有敷设技术来说铝管在 400m 以上半径的弹性弯曲是可以实现的。这对适合地形并避免使用昂贵的转角模块来改变方向来说是基本足够的。为了把输电线分割成便于处理的气室大小，沿输电线的每 1.0~1.5km 安装带锥形气密绝缘盆的隔离模块。

下面给出 GIL 应用的实例。

7.2 应用实例

7.2.1 施卢赫湖，德国，1975

第一个 400kV 的 GIL 应用是德国施卢赫湖抽水蓄能电站。GIL 用来连接山洞内的高压电力变压器和山顶上的架空线。GIL 在 1975 年投入使用，GIL 的系统长度为 700m^[147]。

图 7.1 是向隧道内方向看见的固定在隧道壁上的两个 GIL 系统，GIL 安装在 40° 的山洞内，中间安装有台阶提供安全的人行通道。控制线缆安装在隧道顶部，照片中部可以看到热膨胀波纹管。

山洞电厂是德国南部 400kV 输电网的一部分，每天按要求向系统中提供高峰负荷。一般来说白天向系统中送电，发电机在夜间以水泵模式工作，从低位水库向高位水库抽水。起初山洞到架空线的 400kV 输电线是用充油电缆的。充油电缆出了事故，引发的火灾把电缆和隧道都破坏了。新隧道选用了不燃烧的 GIL 来连接。

山洞电厂向 400kV 电网输送 1000MW 的高峰负荷电力。这段 GIL 是世界范围首次安装——1974 年建设，1975 年投运。两个 GIL 系统的尺寸适用于最高运行电压 400kV，最高额定电流 2500A。GIL 与两台各为 600MVA 的变压器相连接，变压器把 21kV 的发电机电压与 400kV GIL 的网络电压连接起来。图 7.2 是隧道截面布置示意图。

施卢赫湖的 GIL 技术是带衬套的焊接，这种连接技术把两段管子用衬套上的两



图 7.1 德国施卢赫湖 GIL 隧道视图，1975

个 V 形轨道焊缝。外壳管有纵焊缝，如图 7.3 所示。
施卢赫湖的 GIL 技术参数见表 7.2。

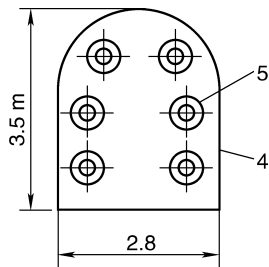


图 7.2 德国施卢赫湖截面图



图 7.3 隧道内两个 GIL 系统视图

表 7.2 施卢赫湖的 GIL 技术参数

额定电压	420kV
额定电流	2000A
额定冲击试验电压	1640kV
额定短时电流	53kA/1s
每相长度	4.2km
绝缘气体	100% SF ₆

GIL 垂直段和斜坡段的总长度为 700m，隧道内管道总长度为 4200m。
山洞电厂 GIL 的运行经验非常好，至今已运行了 35 年以上，未发生任何运行问题，气密性非常高，因此即使运行了 35 年也仍然不需要加绝缘气体。项目中首次应用的焊接技术证明外壳管连接的可靠性和气密性都非常好，导体管的导电性也非常好。
为了保护 GIL，在架空线连接处装有避雷器。避雷器可以保护 GIL 不受架空线雷击的影响。这个保护系统保护了 GIL 35 年以上不受过电压影响。至今，经过 36 年的运行，GIL 没有老化现象。

7.2.2 温得和克，纳米比亚，1977

1977 年在纳米比亚温得和克安装的 GIL 是第一个水电站竖井内的垂直安装。这个项目证明 GIL 可以安装在长竖井内。导体由盆式绝缘子支撑，外壳用钢结构固定在竖井壁上。图 7.4 是竖井向视图。
竖井的总高度为 115m，GIL 连接洞中的高压变压器和洞上的变电站，如图 7.5 所示。
技术参数见表 7.3。
这个项目的要求是做 115m 的垂直连接，这是 GIL 可以解决的。纳米比亚温得

和克山洞电厂在额定电压 245kV，额定电流 630A 下运行。这个 GIL 垂直安装于 115m 深的竖井内。铝管的刚性设计和以气体作为绝缘介质使得安装很简单。这个 GIL 管道总长度为 800m，1977 年开始运行，如图 7.5 所示。



图 7.4 温得和克垂直 GIL，1977

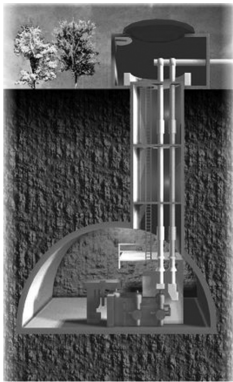


图 7.5 垂直 GIL 图解

表 7.3 温得和克技术参数

额定电压	245kV
额定电流	630A
额定冲击试验电压	1050kV
额定短时电流	40kA/3s
每相长度	0.8km
绝缘气体	100% SF ₆

7.2.3 约书亚瀑布，美国，1978

这个 GIL 是世界范围第一个直埋版的。为了改善一个新建变电站的整体外观影响选用 GIL 作为 GIS 与架空线之间的连接，架空线的连接点与变电站较远。图 7.6 可以看见安装和敷设过程中的明沟。

这个 GIL 有两个系统共 1.7km 长。敷设路径要求多次改变高程以及用转角模块改变垂直方向，如图 7.7 所示。

方向改变的半径为 250m，除被动腐蚀保护（图 7.6 白色涂层）以外，还加装了阴极保护用来防止铝管锈蚀，这在 1978 年就投入使用了。用于铝管的电势由 GIL 系统两端的极化电池来提供，极化电池与地绝缘，产生合适的电压。GIL 可靠接地并在端部互相联接，使感应电流在外壳内流通并使磁场最小。

GIL 段的运输长度为 18m，在现场焊接连接。直埋 GIL 一直用焊接连接。表 7.4 为技术参数。



图 7.6 美国约书亚瀑布，敷设过程，1978



图 7.7 美国约书亚瀑布，垂直与水平的方向改变，1978

表 7.4 1978 年约书亚瀑布技术参数

额定电压	145kV
额定电流	2000A
额定冲击试验电压	650kV
额定短时电流	63kA/3s
每相长度	1.7km
绝缘气体	100% SF ₆

7.2.4 鲍曼维尔，加拿大，1985 -7

安装于加拿大鲍曼维尔的 GIL 是世界上额定电流最高的，安装于 1985 ~ 1987 年，最大持续额定电流 8000A，最大短路电流 100kA。室内的 GIS 经由不同的 GIL 与架空线连接，总共安装了 2.5km 的 GIL，现在已经成功运行了 15 年。图 7.8 是总示意图。

室内 GIS 到架空线连接的 GIL 安装在钢结构上，周围户外条件要求低温、冰载和风载。图 7.9 是 GIS 变电站室内地上安装的 GIL，图 7.10 和图 7.11 是变电站户外安装的状况。

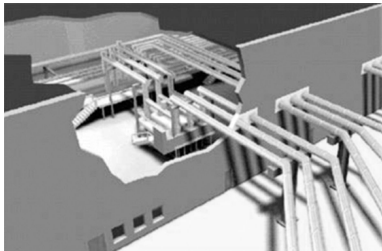


图 7.8 加拿大鲍曼维尔的总示意图，1985 -7

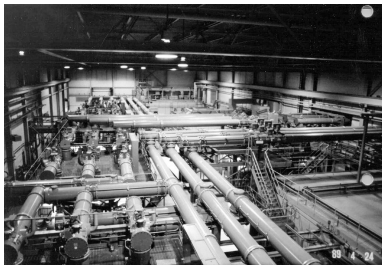


图 7.9 GIS 变电站室内的 GIL



图 7.10 GIL 与户外架空线的连接



图 7.11 地上安装 GIL 的钢结构

表 7.5 为技术参数。

表 7.5 加拿大鲍曼维尔的技术参数

额定电压	550kV
额定电流	4000/6300/800A *
额定冲击试验电压	1550kV
额定短时电流	100kA
每相长度	2.5km
绝缘气体	100% SF ₆

* 取决于变电站间隔。

7.2.5 Shin – Meika 东海线，日本

在日本，最长的 GIL 安装在 3.3km 长的隧道内。运行电压为 275kV，额定电流为 6000A，这个 GIL 从 1998 年开始投入运行^[163-166]。这个 GIL 是在现场隧道内对 14m 长的段进行焊接装配的。整个输电线进行了现场高压试验^[167]。

表 7.6 为主要技术参数。

表 7.6 Shin – Meika 东海线技术参数

额定电压	275kV
额定电流	6300A
额定冲击试验电压	1050kV
额定工频试验电压	460kV
每相长度	9.9km
绝缘气体	SF ₆

图 7.12 的路径布置图表明连接日本大陆东海变电站（Tokai S/S）和太平洋名古屋湾新名古屋半岛的新名古屋电厂及变电站（P/S）的 3.3km 长的东海线。东海线敷设在底部有两条液化天然气（LNG）管道，上部有两回三相 GIL 的双隧道系

统内，如图 7.13 所示。

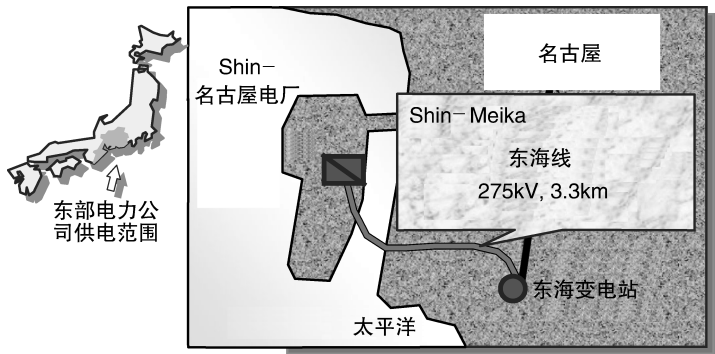


图 7.12 日本 Shin - Meika 东海线路径图

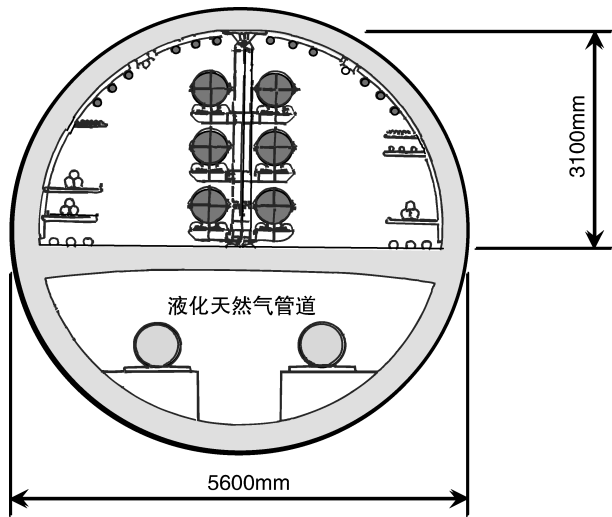


图 7.13 双隧道系统。上部：两个 GIL 系统，下部：液化气管道

图 7.14 表明 GIL 的装配过程，图左面是竖井，预先加工的 GIL 段被运输到收料区，然后用吊车从竖井吊到隧道内。在竖井内有轨道运输系统把 GIL 段沿着 3.3km 长的隧道输送到装配地点。GIL 段只有一个运输井。示意图还表示了装配工艺的 4 个步骤。

第一步是把调整装置固定在隧道内，用于承载单相绝缘 GIL 管的钢结构在隧道中央固定在隧道地面和顶部。在连接步骤中，GIL 段的连接是把导体用插头插座连接再把外壳管的焊接做准备。第三步是用电弧焊接把外壳管焊接起来。最后一步是充气步骤，GIL 充入绝缘气体，为现场高压试验作好准备。

图 7.15 是 GIL 隧道在安装 GIL 之前的视图。在隧道的中部可以看到用来固定

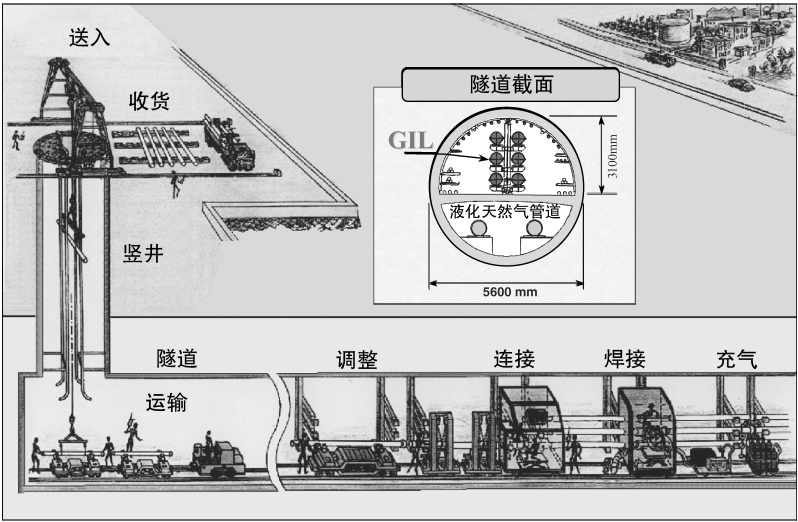


图 7.14 Shin - Meika 东海线，装配过程

GIL 段的钢结构，左侧和右侧各有一条轨道运输系统用来沿着 3.3km 长的隧道运送 GIL 段。

GIL 段放置在半管形固定点上，允许热膨胀产生的轴向运动。图 7.16 是钢结构，照片右面是用于装配导体插头插座连接以及为外壳做焊接准备的清洁棚。



图 7.15 隧道内截面图



图 7.16 固定 GIL 的钢结构截面图

每个 GIL 段都是在工厂完成预装配并用卡车送到现场运输井的。图 7.17 是 14m 长的 GIL 段。为了避免运输中振动对 GIL 段的伤害还开发了特殊的运输工具。图 7.17 是正在准备放入隧道进行敷设的 GIL 段。

3.3 公里长的东海线是世界上最长的 GIL 工程。这个大电流（6300A）工程把新名古屋燃气轮机电厂和东海变电站连接

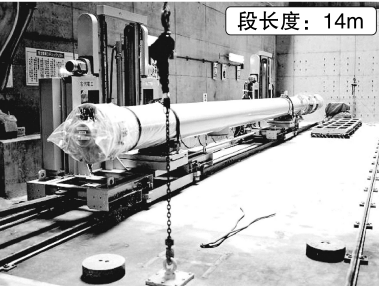


图 7.17 敷设前准备好的 GIL 段

起来向名古屋高工业区输送电能。这个 GIL 工程从 1998 年开始投入运行后未发生任何中断或问题。两个回路共有 2850MVA，该工程为名古屋地区的电力供应作出了巨大贡献。

根据要求把输气管道和 GIL 结合，设计了直径为 5.6m 分为两半的隧道，上部分 3.1m 用于 GIL，现场安装过程必须解决工作空间狭窄、周围灰尘以及在水平和垂直三度空间转弯的问题。导体的插头插座连接系统、全部自动化的焊接工艺、洁净室工作棚以及 GIL 段的模块化连接工艺等一系列的手段提供了可靠装配和零失效运行。

经过 12 年以上的运行，现在这个 GIL 证明了它在输送大容量电力非常高的可靠性。

7.2.6 PALEXPO，日内瓦，瑞士，2001

2001 年在瑞士日内瓦 PALEXPO 安装的 GIL 是世界上第一个充 N_2/SF_6 混合气体的工程。这个应用仅仅是作为架空线输电的地下部分。混合气体技术是为长距离地下输电研发的，PALEXPO 项目是首次应用^[168]。十多年后的现在该项目仍在没有问题地可靠运行，参见第 2.2.2 节。

这个任务是要把日内瓦机场 PALEXPO 展览馆的架空线改造成隧道内的地下连接，图 7.18 显示将要被替换的架空线。



图 7.18 日内瓦 PALEXPO，架空线的替代

GIL 的路径如图 7.19 所示。

新展厅（6 号厅）是 175 塔和 176 塔之间采用 470m 长的地下输电线路的原因。图 7.19 俯视图显示地下隧道的路径在架空线边上，原因是隧道要挖在与高速公路平行的一条路的下面，这样可以给从上面向下挖掘的竖井施工方法的现场工作提供最佳便利。

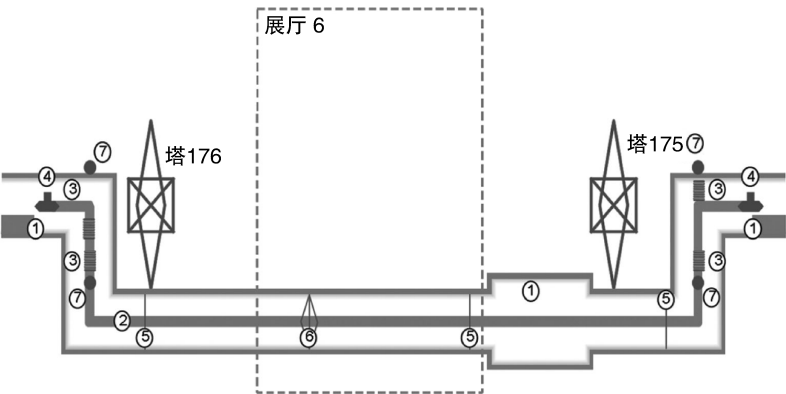


图 7.19 PALEXPO，一览俯视图

安装的入口（1）是安装时进入隧道的竖井，GIL 的直线单元（2）是弯曲的，和隧道的弧度相配和，最小弯曲半径是 $R \geq 400\text{m}$ 。膨胀节（3）用于补偿 GIL 的热膨胀，GIL 在钢支架（5）上是自由活动的，在隧道的中央 GIL 固定在固定支架（6）上。方向的转换由 90° 角的转角模块（3）来实现，GIL 的端部是气密的，用隔离模块（4）形成封闭气室。然后隔离模块与 SF_6 /空气套管连接，在隧道上部 175 塔和 176 塔处把 GIL 与架空线相连。

表 7.7 为 PALEXPO 项目的主要技术参数。

表 7.7 瑞士日内瓦 PALEXPO 项目技术参数

额定电压	220kV
额定电流	2000A
额定冲击试验电压	850kV
额定短时电流	50kA
每相长度	0.8km
绝缘气体	80% N_2 /20% SF_6

在图 7.20 中可以看见两个 GIL 系统，在右面可以看见 90° 的转角模块。在这个项目中首次利用弹性弯曲来适应隧道的形状，这一段的弯曲半径是 700m。

PALEXPO 项目 GIL 的应用是按长距离应用的工艺来建造的。该敷设工艺在第 3.7 节有介绍。

7.2.7 百特威尔逊电厂，美国，2001

百特威尔逊电厂于 2001 年安装于美国密西西比，跨过一段河道，在河流高水位时会被淹没。GIL 在数条 550kV 和 242kV 输电线下穿过，给出了经济的解决方案。如果从 550kV 输电线上面穿过就需要很高、很贵并且（在飓风地区）有风险的解决方案。

在图 7.21 中可以看见 GIL 在 550kV 和 242kV 输电线下面。GIL 安装在钢支架上，意图是要高于最高水位时的水面，用围栏围起防止破坏。



图 7.20 PALEXPO，隧道内视图



图 7.21 美国百特威尔逊电厂 GIL，2001：
在 550kV 和 242kV 架空线下面概览

表 7.8 为百特威尔逊项目的主要技术参数。

表 7.8 百特威尔逊电厂 GIL 项目的技术参数

额定电压	550kV
额定电流	4500A
额定冲击试验电压	1550kV
额定短时电流	80kA
每相长度	3.75km
绝缘气体	100% SF ₆

7.2.8 柿莲，泰国，2002

柿莲变电站是曼谷电网的重要变电站。现有 GIS 的扩建需要在现有 GIS、现有 AIS 和新扩建的 GIS 之间做长距离的连接，为了这个原因需要安装系统长度 1km 或管子长度 3km。这段 GIL 是第一个用 40% N₂ 和 60% SF₆ 混合气体的 550kV GIL。

这个项目的输电要求高，在 550kV 额定电压下需要 4000A 的额定电流以满足连接于该变电站的输电线的要求。同时周围空气温度高达 50℃，并且还有直接阳光辐射也高。GIL 可以满足所有这些要求，并且从 2002 年 9 月开始成功投入运行。这个 GIL 项目的概览如图 7.22 所示。



图 7.22 GIL 安装概览

柿莲的 GIL 是根据瑞士日内瓦 PALEXPO 项目的同样工艺来安装的，轨道焊接方法、混合气体、现场 GIL 段的装配和牵引方法都有应用^[74]。

周围温度高、极端阳光辐射等极端外部条件和高额定电流都让这个向曼谷送电的重要输电线表明 GIL 可以在极端天气条件下具有高输电能力。

现场装配是在装配棚里进行的。焊接准备工作所需设备，GIL 的直线模块、转角模块、补偿器和隔离模块的预装配都是在装配棚里进行的。为了提供良好的工作条件在棚里安装了空调，为了保证内部清洁度还设置了封闭并受控的人员和材料的通道系统。

图 7.23 显示柿莲的装配帐篷。

图 7.24 显示装配帐篷的内部，可以看见 GIL 的直线模块在焊接准备过程中。

表 7.9 为泰国柿莲项目的技术参数。



图 7.23 柿莲装配帐篷



图 7.24 柿莲装配帐篷内部

表 7.9 泰国柿莲项目的技术参数

额定电压	550kV
额定电流	4000A
额定冲击试验电压	1550kV
额定短时电流	63kA/1s
每相长度	3.5km
绝缘气体	40% N ₂ /60% SF ₆

7.2.9 PP9，沙特阿拉伯，2004

2004 年在沙特阿拉伯 PP9 的 GIL 装置是为 8 组发电厂与 400kV 输电电压的变电站相连接而建设的。这套装置为地上钢结构安装，选择 GIL 的主要原因是沙漠中高湿度和高粉尘的苛刻气候条件^[169]。



图 7.25 沙特阿拉伯图 PP9 地面图，2004

GIL 的高可靠性和低传输损耗是选择 GIL 的主要原因。单相 GIL 的总长度为 17km。在图 7.25 中可以看到架设在距离地面 5m 的 GIL 的壮观景象。

表 7.10 为沙特阿拉伯 PP9 项目的技术参数。

表 7.10 沙特阿拉伯 PP9 项目的技术参数

额定电压	420kV
额定电流	55℃时 1200A
额定冲击试验电压	1425kV
额定短时电流	63kA
每相长度	17km
绝缘气体	100% SF ₆

7.2.10 开罗北，埃及，2005

埃及开罗北的 GIL 装置用于电厂扩建，连接的 GIL 安装于跨越现有设备的高度。开罗北电站的 245kV GIL 于 2004 年调试，粉尘、砂土、湿度等严酷气候条件是该项目选择 GIL 的主要原因。在图 7.26 可见电厂与变电站的连接。图 7.27 为变电站厂房的连接。



图 7.26 开罗北 245kV GIL



图 7.27 开罗北 245kV 与变电站建筑的连接

表 7.11 埃及开罗北项目的技术参数。

表 7.11 埃及开罗北项目的技术参数

额定电压	245kV
额定电流	3150A
额定冲击试验电压	1300kV
额定短时电流	50kA
每相长度	3.5km
绝缘气体	100% SF ₆

7.2.11 海姆霍，米德兰，英国，2005

海姆霍变电站是伦敦地区电力供应的重要连接，变电站从 275kV 升级到 400kV 需要建设新的输电线，为了把这些新线与 GIS 相连接需要用 GIL 从架空线下通过，如图 7.28 所示。

图左面的绿线部分安装于变电站内地面以上的钢结构，变电站围栏外的 GIL 进入覆盖混凝土板的地下沟渠，GIL 在围栏内的架空线塔下从沟渠中出来并通过安装于架空线塔的套管与架空线连接。

表 7.12 为技术参数。

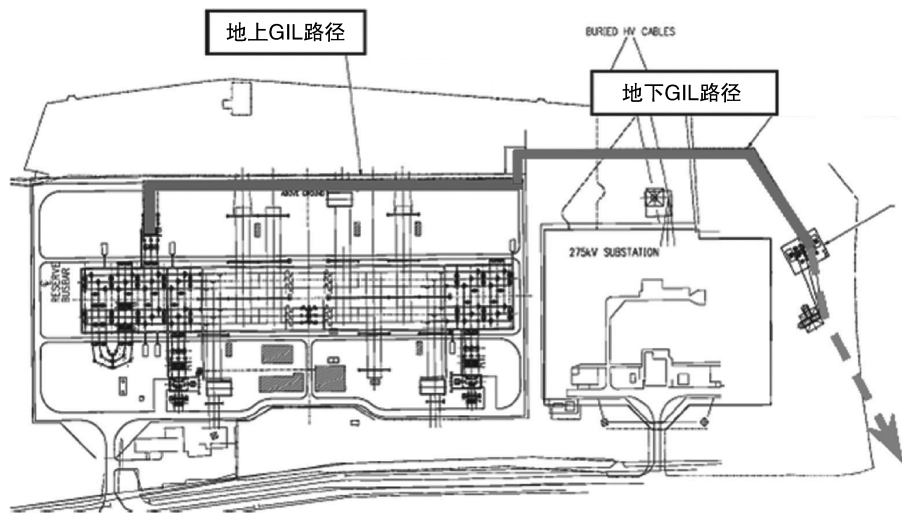


图 7.28 海姆霍变电站地上及地下 GIL 概览

表 7.12 英国米德兰海姆霍项目的技术参数

额定电压	420kV
额定电流	3150A
额定冲击试验电压	1425kV
额定短时电流	63kA
每相长度	1.5km
绝缘气体	80% N ₂ /20% SF ₆

7.2.12 黄河拉西瓦，中国，2009

中国的黄河拉西瓦水电站是世界上首个 800kV GIL，安装于分别有垂直和水平部分的隧道内。垂直部分有 209m，GIL 总长度为 2.75km。图 7.29 是水平隧道部分，两个 800kV GIL 系统安装在隧道壁上。

图 7.30 是垂直隧道，可以看见两个 209m 高的 800kV GIL 系统，单相 GIL 用钢支架安装在隧道壁上。

表 7.13 为中国黄河拉西瓦水电站项目的技术参数。



图 7.29 中国黄河拉西瓦, 2009, 水平隧道



图 7.30 中国黄河拉西瓦, 2009, 垂直隧道

表 7.13 中国黄河拉西瓦项目的技术参数

额定电压	800kV
额定电流	4000A
额定冲击试验电压	2100kV
额定短时电流	63kA
每相长度	2.75km
绝缘气体	100% SF ₆

7.2.13 克尔斯特尔巴赫, 德国, 2010

法兰克福机场扩建需要把 220kV 的架空线埋入地下并把输电电压提高到 400kV。在图 7.31 所示现场施工图中可以看到架空线和直埋 GIL，也可参见第 2.2.2.4 节。在照片的中间可以看到在敷设明沟上的现场安装帐篷，GIL 在帐篷内完成装配和焊接，然后被拉入明沟^[170]。

图 7.32 是安装帐篷内部图，直线模块和转角模块在帐篷内进行敷设之前的预装配。



图 7.31 德国克尔斯特尔巴赫直埋 GIL, 2010



图 7.32 装配帐篷内部

直线模块在现场用自动轨道焊接工艺进行焊接，如图 7.33 所示。

直线模块在安装帐篷内焊接，然后拉入明沟，在图 7.34 可以看到明沟封闭之前明沟内的两个三相系统 6 个单相 GIL 管。



图 7.33 德国克尔斯特巴赫现场焊接



图 7.34 德国克尔斯特巴赫，沟渠内回填前的 6 根单相 GIL

表 7.14 为用 N_2/SF_6 混合气体的直埋 GIL 项目的技术参数。

表 7.14 2010 年德国克尔斯特巴赫直埋 GIL 的技术参数

额定电压	420kV
额定电流	3000A
额定冲击试验电压	1425kV
额定短时电流	63kA
每相长度	6km
绝缘气体	80% N_2 /20% SF_6

7.2.14 溪洛渡，中国，2011

中国溪洛渡水电站需要 7 个垂直的 GIL 系统从水电站坝底到坝顶 550kV 电网的输电，水坝如图 7.35 所示。

图 7.36 是垂直 GIL 的原理，总高度 620m 在坝内垂直方向分为两段，7 个三相系统的单相 GIL 总长度累积为 12km。



图 7.35 中国溪洛渡，水电站概览，2011

表 7.15 为溪洛渡垂直 GIL 的技术参数。

表 7.15 2011 年中国溪洛渡的技术参数

额定电压 U_r	550kV
额定电流 I_r	4500A
额定冲击试验电压 U_{BL}	1550kV
额定短时电流 I_s	63kA
每相长度	12km
绝缘气体	100% SF_6

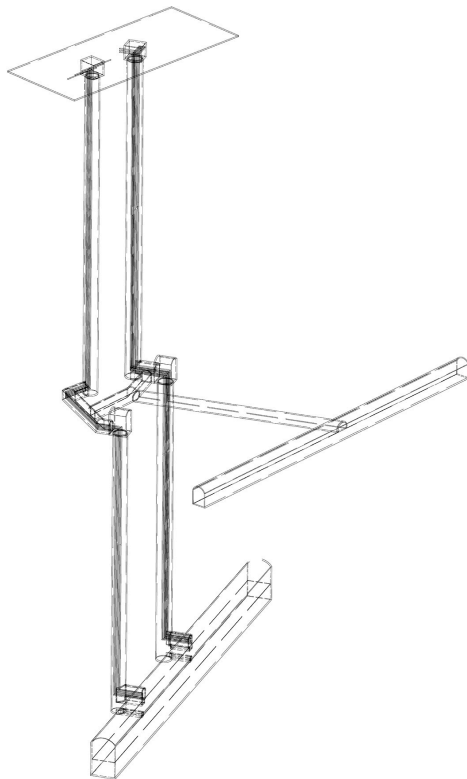


图 7.36 中国溪洛渡，垂直 GIL 的原理

GIL 用焊接技术安装，安装工作计划于 2013 年完成。

7.2.15 锦屏 I，中国，2011

中国的另一个水电站锦屏 I 需要在坝内安装垂直的 GIL。大坝建在中国的一条河上，在偏远地区向大都市地区输送可再生能源，图 7.37 是这条河的外貌图。

锦屏 I 水电站坝内 GIL 的原理如图 7.38 所示，GIL 把坝内的发电机和坝外的 550kV 输电线通过隧道内的竖井连接起来，GIL 的总单相长度为 32km。GIL 用 SF₆ 绝缘，GIL 段用焊接技术连接。

表 7.16 为锦屏 IGIL 项目的技术参数。



图 7.37 锦屏 I，水电站概览，2011

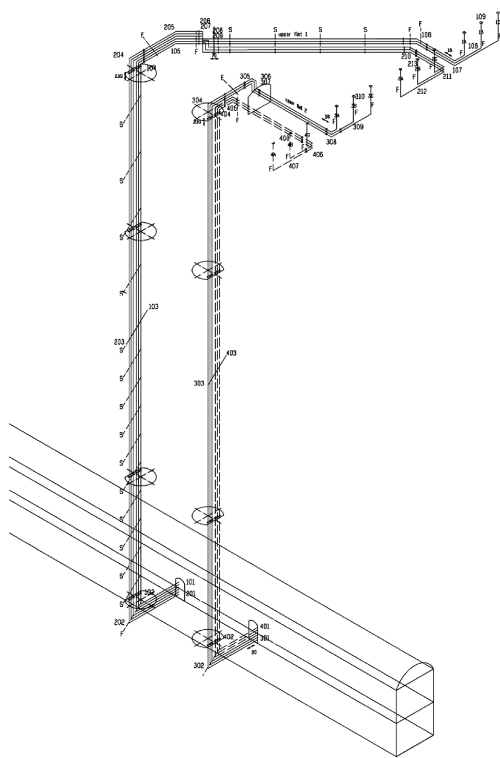


图 7.38 锦屏 I，大坝内 GIL 的原理

表 7.16 2011 年中国锦屏 I 的技术参数

额定电压 U_r	550kV
额定电流 I_r	4000A
额定冲击试验电压 U_{BIL}	1550kV
额定短时电流 I_s	63kA
每相长度	3.2km
绝缘气体	100% SF ₆

7.3 未来的应用

7.3.1 概述

本节中我们探讨未来 GIL 在大容量输电网中可能的新应用^[173,174,203]。

7.3.2 交通隧道

GIL 可以结合在公路或铁路隧道中，因为它不会对隧道的其他使用者带来损

害。GIL 可以用钢结构固定在隧道顶上，固定点之间可以很长（30 ~ 40m），或者敷设在单独的也可用于紧急逃生的隧道^[174-177,210]。

GIL 的容性负荷低，可以建造不需要补偿的单相长度达到 80km，由于这个原因，像规划中的阿尔卑斯山这样的很长的铁路隧道都可以配置 GIL。

气体绝缘输电线是用铝管做导体和外壳的大容量输电系统，绝缘介质为 N_2 和 SF_6 混合气体。坚固的金属外壳机械强度很高，可以承受外来和内部的应力，甚至可以承受内部电弧这样的极端情况。在 63kA 电弧电流持续 0.5s 后在外壳内只能看到很少的材料变形。这种耐电弧能力的原因可以在 N_2 和 SF_6 混合气体中的燃弧过程中发现， N_2 和空气相似，可以使电弧根部很宽，造成外壳表面温度低，结果是材料的融化不会发生，巨大的气室使得压力上升很少。

用 N_2 和 SF_6 混合气体的气体绝缘输电线路表现出的物理特性提供了与公众可以进入的隧道（铁路隧道或公路隧道，见图 7.39）相结合的新的应用可能性。

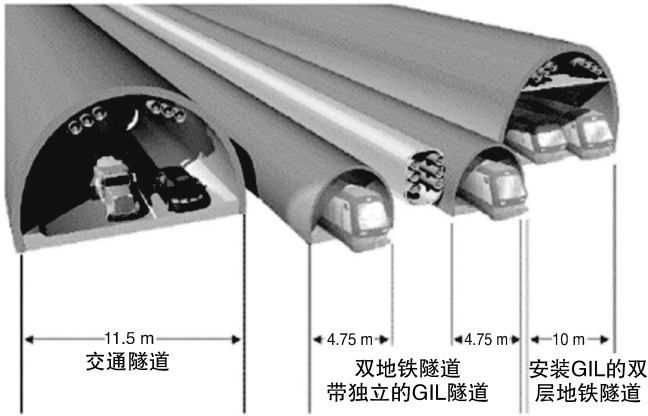


图 7.39 典型的在交通隧道内的 GIL

GIL 可以很安全地结合在铁路或公路交通隧道中。如第 3 章所述，GIL 有着坚固的金属外壳，不会烧穿也不会爆炸。GIL 与公路或铁路交通隧道的结合如图 7.39 所示。有三个结合的例子，第一个例子是汽车隧道，GIL 安装在隧道的顶部；第二个例子是双地铁隧道与独立的 GIL 隧道结合；第三个例子是双层地铁隧道，GIL 安装在其中。

这些交通隧道与 GIL 的结合应用在世界几个地方在进行研究。在欧洲的阿尔卑斯山正在计划把德国、奥地利、瑞士、意大利和法国几个国家互相连接起来以改善交通并进行电力交易。在中国和印度尼西亚也正在研究大陆和岛屿之间以及外围岛屿之间的连接。在不远的将来 GIL 将在经济上成为有前途的并会在大容量、长距离输电线中得到广泛应用^[5,9,10]。

7.3.3 道路及高速公路

GIL 的长距离应用可以与公路或高速公路相结合,图 7.40 显示 GIL 敷设在 5m 宽两车道公路的路基内,管子之间的距离为 1.5m,管子以上最少覆土高度为 1.0m^[173],尺寸数据见表 7.17。

双 GIL 系统在 400kV 额定电压下将允许两倍的 2000MW 输送容量。由于 GIL 外部磁场低,对车辆电子系统影响不大。GIL 的低电容负荷允许长距离不需要相角补偿,典型的长度 80km 不补偿是可能的,取决于连接电网的条件。GIL 即使在内部电弧时安全水平也很高,可以与公共交通结合。GIL 的低传输损耗可以把土壤最高温度限制在 40℃ 温度限值内^[76,79,147,178,179]。

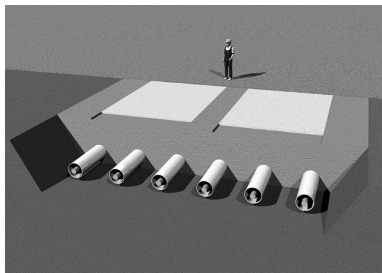


图 7.40 双车道公路下直埋 GIL

7.3.4 地上安装及野外安装

本节介绍了应用于变电站以外若干种敷设方式。GIL 在有围栏的变电站之外需要一些防止破坏以及对这种高电压大容量输电系统进行危险操作的保护措施。其中一种可能性如图 7.41 所示, GIL 由轻质墙来阻止公众进入,这种墙也用于固定 GIL。

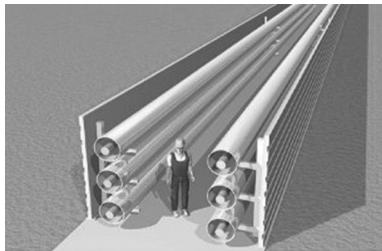


图 7.41 有保护墙的地上安装的 GIL

7.4 案例分析

未来大容量互联对输电系统是个挑战, GIL 提供了有意义的解决方案。

7.4.1 大都市区域

全球各地的大都市区域的负荷密度都在增加,特别是在都市中心区。大都市区域新建配有空调和很多其他电器的大体量居民楼和高层办公楼对电力的需求每年增加 10%^[173]。以下简短的历史综述说明了过去 30 年中大都市区域供电是如何发展的。图 7.42 表示都市区域的供电原理,在郊区发出的电经由 400kV 或 500kV 的架空线输送到都市区域,短路电流为 40kA。围绕都市区域有数个用输电铁塔表示的变电站组成旁路或环形结构,110kV 电缆从这些变电站向市中心输电,再经由中压配电^[81,151]。

图 7.43 的都市区域有了发展,市中心出现更多高层建筑。大多数城市仍然有

400/500kV 的环城线路，但短路电流增加到了 50kA，在某些地方甚至达到 63kA。注意来自另一个郊区发电区域的第二条线与环线相接。更多的 110kV 电缆从环线向市中心的配电变电站送电。此外，世界范围大短路电流额定值的经验告诉我们由于机械问题短路电流额定值不会超过 63kA 以上很多。因此，增加城市输电的唯一方法是敷设向城中心输送 400kV 大容量电力的地下系统，在这种情况下 GIL 给出良好选择。

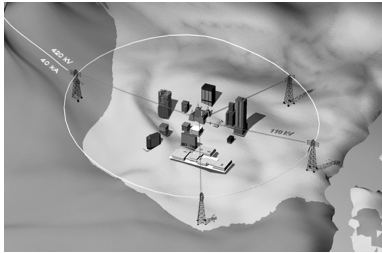


图 7.42 1970 年代都市区域的供电



图 7.43 2000 年代都市区域的供电

图 7.44 表示 2020 年都市区域可能的面貌，同一个都市区域有了更多的高层建筑，有一个 400/500kV、63kA、双系统的 GIL 在对角线方向从地下穿过都市区域。这段 GIL 可能的长度为 30 ~ 60km。这种解决方案把环形线路短路电流额定值拆分成在都市区域中心与 400kVGIL 直接连接的两个半环。



图 7.44 2020 年代都市区域的供电

这种新应用进一步的重大优势是可以由输电公司和交通公司分享隧道的投资。近年来都市中心区域的负荷密度以每年 7% ~ 10% 的速度在增加，原因是世界范围城市中心都在建设办公及居住的高楼、甚至包括购物和剧院的整个城市综合体。世界上都市区域现有的供电方式基本上是以 420/550kV 的环线或旁路为基础的，变电站通过 123/275kV 的电缆与城市中心连接，如图 7.44 所示。

目前在很多城市 123/275kV 电压等级已经达到了输电的极限并且没有场地用于新隧道和电缆沟。在这种情况下对角穿过都市区域的额定电压 400/500kV、额定电流 3150/4000A 的大容量 GIL 成为好的解决方案。与这种大容量输电线相连接的 GIS 可以为市中心的用户服务。

经由这些简短的历史回顾我们说明了都市区域供电在过去 30 年是如何发展的。

7.4.2 伦敦

我们用伦敦城作为正在考虑中的 GIL 应用的例子（见图 7.45）^[81,181]。

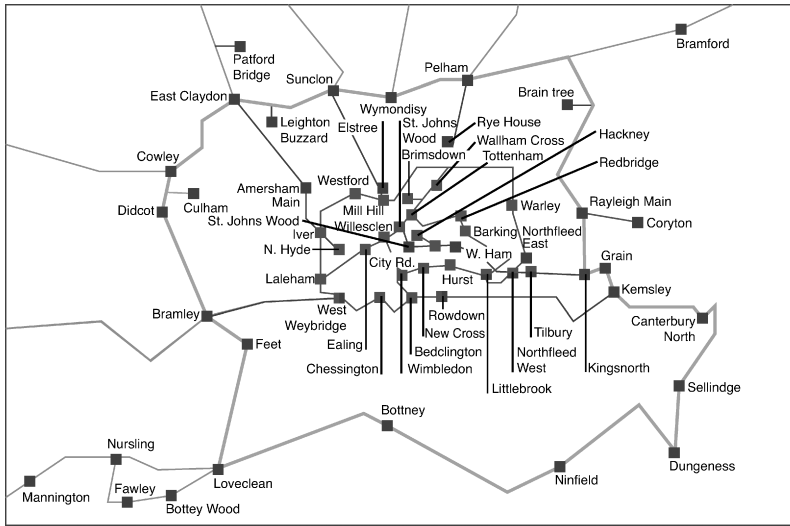


图 7.45 伦敦市区供电：420kV 架空线外环和 275kV 内环，通常为电缆

伦敦有 400kV 环绕城市的架空线路，直径约 80km。沿着环线有若干发电厂，通过 400kV 输电线向伦敦都市区域架空环线送电。这些支线从架空环线向城内 275kV 电缆环线送电，然后是 132kV 及以下的配电电缆从电缆环线向市中心的终端用户送电。目前从 400kV 到 275kV 环支线的负荷已经非常重了，由于公众不接受所以无法建造新的架空线。GIL 可以用新的长距离地下大容量输电为伦敦城市中心供电提供经济可靠的长期解决方案。利用现有资源可以在目前架空线的地下建造直埋敷设技术的 GIL，每个系统可以输送 2800MW。如果用直径 3m 的新隧道安装两个 GIL 系统则可以向市中心输送 4400MW 的电力，每个系统 GIL 输送 2200MW。这可以解决城市中心的大部分输电需求。伦敦只是大都市区域的一个例子，同样的输电问题在任何一个都市区域都会出现。

为了解决未来城市中心的负荷增长问题，GIL 在市中心交叉连接可能是一个解决方案。GIL 外部较低的磁场强度在城市中心是非常重要的优点，在大街上必须满足 $1\mu\text{T}$ （目前瑞士法律的要求）这么低的要求。低的电容负荷也允许建造长度 80km 的系统不需要补偿电气相角。

在人口稠密地区额定电流高达 3150A 或 4000A 的低输送损耗、低磁场强度的大容量连接，是世界范围输电问题的解决方案。GIL 是这些条件下最经济的解决方案^[151,174]。

7.4.3 柏林对角线

大城市的典型供电模式是城市外围大型电厂向城市中心送电。有时是在几百公里以外用 400kV 或 500kV 架空线输电网向城市周边或负荷中心送电，然后由 110kV

至 145kV 电压等级的电缆配电。由于用电需求的增加，需要增加新的配电线路，但是街道上只有有限的空间可以用于敷设从外部架空线向城市中心输电的新电缆^[182-186]。

街道上已经布满了电力电缆、通信电缆、输气管道、饮用水和废水管道。安装于地下深处隧道中的 GIL 可以提供长期解决方案。柏林已经在城市地下 20 ~ 40m 深处建设了直径 3m 的隧道以形成穿越对角线的输电枢纽（见图 7.46），建成跨越 30km 的 400kV 输电线，以 400kV 电压向城市中心送电。这个概念可以被认为是大都市区域供电的解决方案。

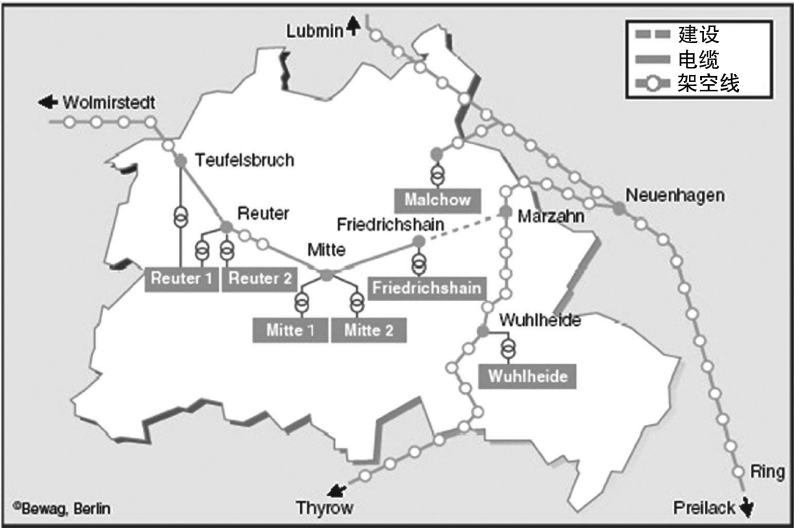


图 7.46 柏林 420kV 对角线供电

城市地下深处 400kV 或 500kV 对角线形式的输电隧道为上海、纽约和墨西哥城这样的大城市提供了解决用电增长的新途径。

这些大城市区域的对角线往往有 30 ~ 60km 长，输电容量达到每个系统 2000MW。GIL 可以在隧道内提供大容量、低温、低磁场和高安全水平的解决方案。未来可靠的供电将由 GIL 来实现^[151,154]。

7.4.4 山区

GIL 可以安装在隧道内穿过山区。奥地利的一个案例分析表明通过隧道把阿尔卑斯山北部和南部的架空线通过隧道连接起来，如图 7.47 所示。这种方式可以解决电网之间的互联问题。

7.4.5 海洋

海上风电场和电网的连接需要新的 400kV 大容量输电线。德国北部海岸线的

地形非常平坦漂亮，人们不接受新的架空线。需要额外的输电容量来把北海的风能送到德国南部的负荷中心。

数千兆瓦的海上风电正在规划中，北海地区只有一条 400kV 架空线来承担由北向南的输电任务，现在已经满负荷了。有必要架设一条并排的架空线，但是会碰到审批问题、至少是在人口稠密区域。此外，海上风电平台到大陆的额定电流 4000A 也可以由 GIL 来解决。在这个案子中 GIL 允许经济的地下解决方案，如图 7.48 所示。

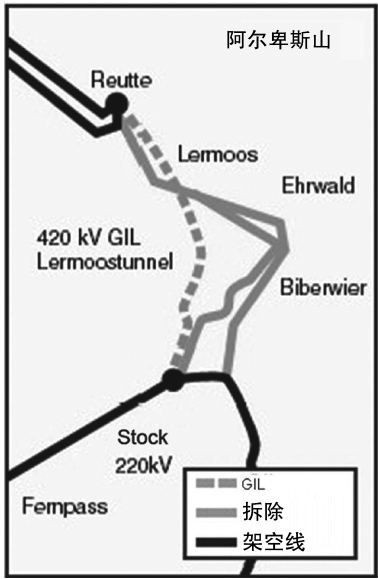


图 7.47 穿越阿尔卑斯山隧道内的 GIL

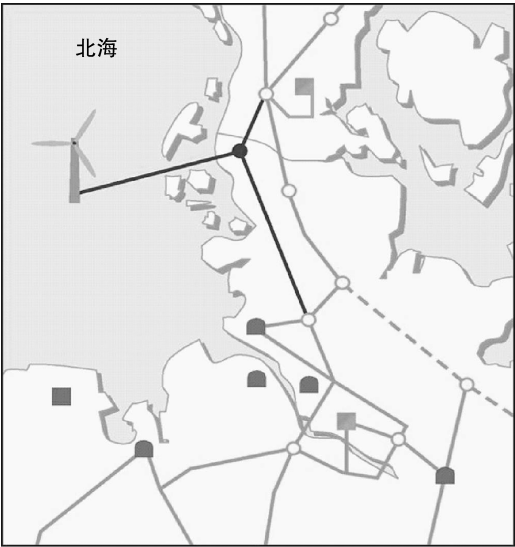


图 7.48 海上风电场与 400kV 输电系统的连接

未来对输电系统的环境要求需要大容量、长距离、低电磁场、高安全性、高可靠性的地下解决方案。GIL 是满足这些要求的唯一技术系统^[154]。

与海上风电场的连接由水底隧道实现把电能收集并集中输送到陆地输电网。

7.4.6 GIL/架空线混合应用

GIL 最可能的应用方式是 GIL 和架空线混合应用。架空线和直埋 GIL 的成本相差很大，这样就需要在允许建设架空线的地方就建设架空线，而在架空线得不到批准的地方建设 GIL。

GIL 与架空线通过套管连接。

混合应用对新输电线的规划提供了新的可能性，并且可以得到优化方案^[211,212]。

第 8 章 输电系统的比较

8.1 概述

输电系统的比较是一个复杂的课题。每个项目从技术和经济方面的差别都非常大。多重因素影响了输电系统的技术结构和投资。纯粹的技术参数在输电线路主要是电压、电流、短路电流、过电压、温升极限及电磁场的极限。另外，现场的条件也是要考虑的，如最大运输重量和尺寸、土壤的特性、运输道路和工作场地也对可行性研究和投资的有重大影响。以后（在运行阶段），一些“软指标”，如外观的美化、隐藏、噪声等对项目的运行，或许会成为最困难的问题。有些因素，如风景区的保护、自然保护区、对动植物的影响等，都需要在电网建设阶段进行考虑，这些因素或许可以让一个输电项目下马^[79]。

除 GIL 外，目前的主要输电方式是架空线和固体绝缘电缆。如果只考虑经济方面的因素，架空线方式的成本最低。但在一些情况下，由于公众的反对或没有空间，架空线方案就不可行。这种情况经常发生在大都市、城市中心、机场或生态保护区。

当需要更高的电力输送能力时，GIL 就有优势了，一条 GIL 线路可以替代 2 条电缆线路^[154]。

8.2 GIL 的特点

在 21 世纪采用大功率的线路来解决繁华地区的用电需求使得这项成熟技术得到关注。这种需求使 GIL 不仅用于短途连接，同时也用于长距离输电。GIL 在一些地区可以替代架空线，如被公众或政府限制下不可能，或不允许的情况下。

GIL 可以在地下传输架空线的全部负荷（如 2000MVA）而不需要安装并排的其他设备和强迫风冷装置。GIL 可以直接地埋安装，隧道安装或者安装在地面上。GIL 不需要安装电抗器作为补偿，即使用于 60~80km 的输电线路。GIL 是一个安全的输电系统。所有材料都是不燃的，并且绝缘气体也是无毒的。GIL 技术在高压输电领域已有 40 年的安全可靠的运行经验^[79,154]。表 8.1 中列出了 GIL 的特点。

表 8.1 GIL 的特点

安全性	• 不可燃的绝缘气体 • 整体接地的外壳
传输容量	• 和架空线一样的传输容量 • 高的过负荷能力 • 低的容性负载
损耗	• 低的线损 • 可忽略的绝缘损耗 ($\tan\delta$) • 相角补偿要求低
EMF	• 非常低的电磁场
电网的连接	• 和架空线一样的线路特性 • 可以和 GIS 直接相连 • 通过套管, 可以容易地和 AIS 设备相连

8.3 技术比较

8.3.1 概述

对不同输电线路进行技术对比需要对许多技术参数进行对比。每种技术（架空线、电缆系统和 GIL）都有各自的特点。在对比中，由于功能的相互依赖，很难有一个简单的答案说哪种方案是最佳的。在此只说明原则上的对比，对影响大或小可以给出定量的分析。每个工程项目都有其自身的特点，技术方面的影响是各自不同的。这就是为什么需要对每个工程项目做各自的分析。

8.3.2 损耗

输电系统的损耗可分为与负荷有关的损耗、介电损耗及与运行设备有关的损耗（如电抗器或电容器组的补偿损耗）等。以下是和输电系统有关的各类损耗的实例^[216]。

GIL/电缆 损耗和输电系统的阻抗有着直接的关系。通常对于大容量的输电系统，架空线和 GIL 都采用铝导体，而电缆采用铜导体。导体截面的大小和材料性能是损耗的基础，见表 8.2^[180]。

与负载有关的损耗应用到一个输送容量为 1100MVA 的输电系统。电缆屏蔽的损耗已经通过采用交叉接地进行了优化，见表 8.2。

表 8.2 1100MVA 输电损耗例子

损耗	充油电缆 (交叉接地)	XLPE 电缆 (交叉接地)	GIL (整体接地)
横截面积/mm ²	2000	1600	导体: 5300 外壳: 16000
导体材料	铜	铜	铝
和负荷无关的损耗/ (W/m)	约 40	5 ~ 10	≈0
和负荷有关的损耗 (导体和屏蔽或外壳) / (W/m)	约 110	约 125	约 73
EMF 水平	高	高	低

介电损耗、与负载无关的损耗完全取决于所使用的绝缘介质。但它们在 GIL 系统中，几乎可以忽略不计，因为 GIL 采用了气体绝缘技术，而且内部所使用的绝缘件的数量也非常少。与负荷相关的损耗与负荷电流的平方成正比，并取决于导体的截面积和直径。由于采用了大截面的导体，GIL 呈现比充油电缆或 XLPE（交联聚乙烯）电缆更低的导体的损耗。图 8.1 是各类损耗与电网传输容量的关系。使用交叉接地的好处是减少了电缆外壳的电流，其外部的电磁场与外部完全接地的系统相比要高。

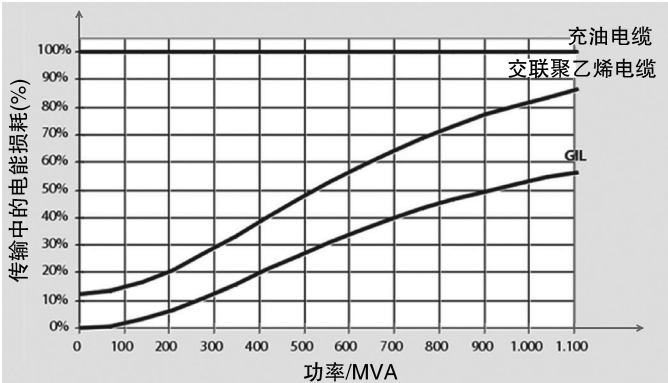


图 8.1 各类 400kV 输电系统和充油电缆损耗的比较

表 8.3 充油电缆、XLPE 电缆和 GIL 的主要物理参数^[38]

	充油电缆 (交叉接地)	XLPE 电缆 (交叉接地)	GIL (整体接地)
单位长度的电感 L'_b / (mH/km)	0.68	0.73	0.22
单位长度的电容 C'_b / (nF/km)	269	183	54
单位长度的阻抗 R' / (mΩ/km)	23	19	9.4
波阻抗 Z/Ω , 但 $Z^2 = L'_b/C'_b$	50	64	63

表 8.3 给出了每公里电感和电容的数值。可以看出负载的容量，和每单位长度

的电容 C'_0 成正比, GIL 要远小于两种电缆。这就是说, 按照输电系统的设计, 当使用 GIL 时, 其所需要的电抗器补偿的费用要少得多。

通常线路的传输容量和波阻抗有关。对此, 可以看出 GIL 的波阻抗和电缆几乎相同, 也就是说, GIL 可以拥有和通常线路一样的传输容量。

若仅考虑输电系统的设备投资 (要少于运营费用), 可以看出, 对于输送容量小的系统, 采用自然冷却方式的电缆系统的造价要比输送容量相当的 GIL 低。对大容量的输电系统, 电缆方式则需要采用强迫风冷、水冷或平行多拼结构的电缆。这就大大增加了输电系统的造价。图 8.2 给出了造价和输送容量的关系。可以看出, 采用自然冷却的 GIL 输电系统, 和同等的电缆系统相比, 有着更高的传输功率和较低的造价。该对比是基于在一般地貌的隧道安装或直接地埋的 GIL。

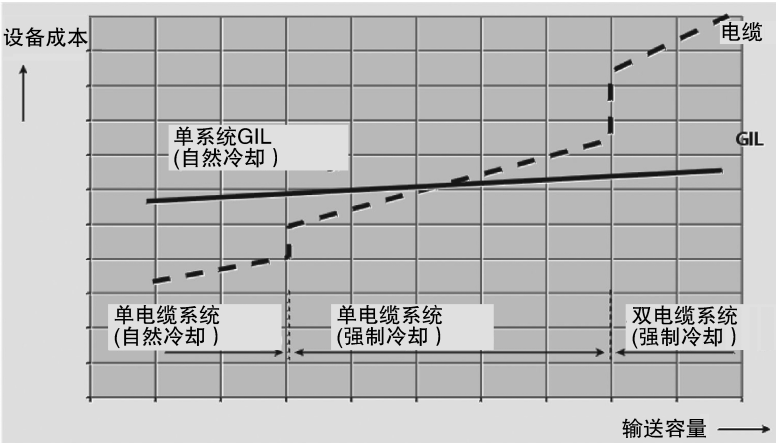


图 8.2 图表：电缆和 GIL 系统的成本对比^[38]

如果是需要大传输容量的地下输电系统来取代架空线的工程, GIL (优势是运行的可靠性和投资成本) 是替代电缆的方案^[38]。

关于输电损耗见 4.3 节。

8.3.3 磁场

对于建在永久居住地或办公区域的输电线系统, 磁场是一个评估依据。磁场直接来自于导体中流经的电流, 对于完全接地的 GIL 或交叉接地的电缆, 外壳和屏蔽层的电流也会产生磁场, 见 5.3 节。

以下研究的架空线架设在“多瑙河塔形”的铁塔上, 有两回 400kV 系统。每侧的三相架空线为三角形的悬挂布置。GIL 和电缆都是单相平行安装在地下, 至少由 1m 深的土壤所覆盖。图 5.4 显示了输电系统周围的磁场分布。可以看出, 对于 GIL, 其磁场强度只有其他设备的 1/10 ~ 1/20^[159]。

磁场高的区域在架空线的三相导线形成的三角形区域内, 见图 8.3。磁场在架

空线外侧逐渐降低，到 40m 的范围会减少到 $5\mu\text{T}$ 以下，参见图 5.4。

磁场最高的区域位于交叉接地的电缆，见图 8.3。该值随着离开电缆迅速减小，在 20m 处已接近于零。电磁场的峰值是 $30\mu\text{T}$ 位于电缆正上方。

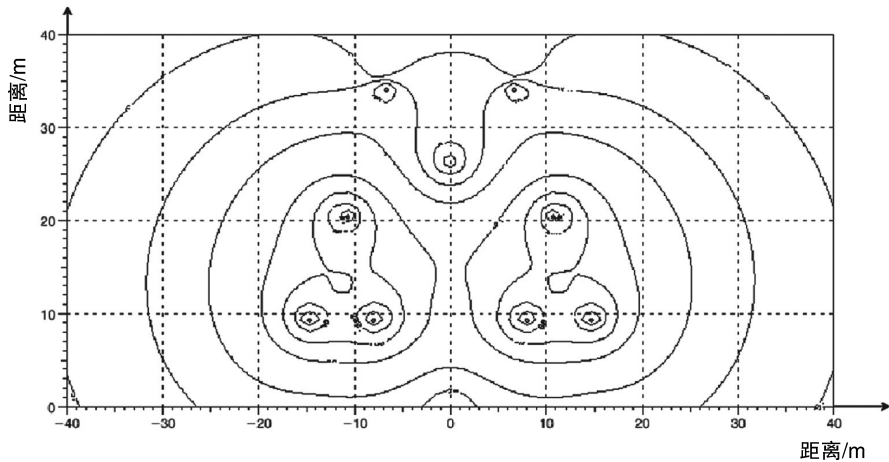


图 8.3 输电系统周围磁场分布

架空线附近的电磁场较为小，为 $24\mu\text{T}$ ，但由于架空线铁塔的建筑物的高度的影响，电磁场传播到边缘，在距离 40m 的地方已经到了 $5\mu\text{T}$ 。电磁场最小的是 GIL，在 GIL 的顶部仅为 $2\mu\text{T}$ 。

每个项目的电磁场都需进行计算，这些值和电流的大小、设备的布置有关。此处仅进行了原理性的介绍。

8.3.4 电压额定值

目前电网运行的最高电压等级见表 8.4。

表 8.4 交流输电系统的最高运行电压等级

线路类型	交流电压
架空线	1200kV，在印度的计划发展中（预计 2012 – 2013）
	1100kV，在中国已运行
	800kV，在美国、南美、亚洲已运行
	550kV 和 420kV，世界各地运行的标准值
XLPE 电缆	550kV，已在运行中，如日本
	420kV，已在欧洲运行
GIL	1200kV，美国在 80 年代的试验项目中
	800kV，已在中国运行
	550kV，已在泰国运行
	420kV，已在欧洲运行

1100kV 或者 1200kV 架空线的塔高为 80 ~ 120m。从 550kV 架空线的铁塔高度到 1100kV 架空线的铁塔高度，增加了一倍，从 40m 增加到 80m。而相应的 GIL 的外径从 500mm 增大到 650mm，不到 20%。也就是说，电压等级越高，GIL 的绝对造价和架空线相比越接近。550kV 的 XLPE（交联聚乙烯）电缆是如今使用的最贵的电缆。至今还在 420kV 电压等级的范围中广泛应用。

在美国有一个 1200kV 的 GIL 的示范工程，但现在已不再使用。最新的 800kV GIL 是位于中国的水电站，从 2008 年已投运至今。世界范围内的标准电压是 550kV 和 420kV。

GIL 用 N_2 和 SF_6 气体作为绝缘气体，运行在 6bar 压力下，和用空气中作为绝缘的架空线相似。所以，GIL 的电气特性和架空线基本一致。

8.3.5 电流额定值

用四分裂导线的典型架空线的额定电流是 3000A。典型 $1600mm^2$ 截面积的铜芯电缆的额定电流是 2000A， $2500mm^2$ 的电流是 2500A。这些典型额定值还和设备的布置方式有关，例如隧道或直埋式布置。

420kV 和 550kV 的 GIL 在隧道和直埋式布置方式下的额定电流是 3000 ~ 4000A。但当用于地面上布置时，电流可到 8000A。额定电流是每个 GIL 项目的设计和技术要求的部分内容^[5]。

电压越高，GIL 的外壳和导体就越大。800kV GIL 的外壳直径为 630mm，额定电流可到 5000A。1200kV GIL 的外壳直径可到 800mm，其电流可到 6000A。

8.3.6 短路电流额定值

额定短路电流是一个较为复杂的设计准则，这个数值直接影响到导体和接地系统。该设计需要考虑导体间电磁场的作用力以及 GIL 导体和外壳、电缆屏蔽层和架空线接地线的热效应。63kA 的短路电流是标准值。有些项目中为 80kA，甚至一些项目达到 100kA。GIL 的完整接地和外壳的交叉互联接地可满足这些高的额定值。

输电系统的架空线用自己的接地线来保证安全接地系统连接到后面的变电站，可以使用保护系统来跳开这条线路。短路电流的极限是由导体的极限耐受能力，以及接地线的横截面的大小和导线的过热能力来决定。增大短路电流额定值需要加大架空线的投资。由于额定短路电流的限制，电缆需要有电缆故障保护来保护电缆在短路电流下不会损坏。若额定短路电流太高，电缆屏蔽层的截面太小会造成过热。

8.3.7 过电压

过电压来自于电网上的开合操作或架空线遭受的雷击。过电压可以传导到与之相连的架空线、GIL 或者电缆上。架空线采用铁塔上的绝缘子作为过电压放电装置。GIL 和电缆可以通过提高绝缘水平来耐受过电压。通常，连接在架空线上的

GIL 和电缆可以采用装在连接处的避雷器来保护。现在, GIL 和电缆的过电压保护避雷器已经非常有效了, 可以保护它们不受高频的暂态过电压的危害。

8.3.8 温度限制

取决于材料的性能, 架空线的温度限制是由绝缘子决定的, 为 $100 \sim 120^{\circ}\text{C}$ 。增加架空线的长度并限定架空线的垂度来保证到地面的安全距离, 可以提高温度范围。

电缆的温度极限由绝缘材料的性能和土壤或者隧道的最高温度来决定。温度极限由电缆的长度或者电缆接头来确定。对于直埋式电缆, 最高温度是 $40 \sim 50^{\circ}\text{C}$, 隧道安装时的温度是 $60 \sim 70^{\circ}\text{C}$ 。

GIL 的运行的最高温度由绝缘材料来决定, 其温度在 $105 \sim 120^{\circ}\text{C}$ 。按照相关标准规定的可触摸温度, 对于直埋式 GIL, 土壤温度的范围是 $40 \sim 50^{\circ}\text{C}$, 当安装在隧道时为 $60 \sim 70^{\circ}\text{C}$ 。

8.4 现场的比较

现场运输线路对 GIL 的技术可行性和经济性有着重要的影响。线路的规划是一个复杂的调研过程, 有着大量的相关工作。下面对一些参数进行了解释。

8.4.1 可接近性

线路的可接近性和现场的施工条件决定了安装或者敷设的速度。架空线有着优良的现场施工可接近性。铁塔的材料相对较轻并容易运输。在某些特殊条件下, 若没有道路, 可以用直升机来运输预装好的铁塔。但电缆通常不行, 电缆需要路上运输并采用重型卡车来运输。因此, 现场条件有时决定了电缆的最大运输重量。

GIL 采用了铝管和导体来运输。铝管的重量较轻, 但运输条件决定了现场的可接近性。GIL 的管道通常的长度是 $12 \sim 15\text{m}$ 来满足现场的运输条件。

8.4.2 最大重量

输电线通常架在农村地区并受道路和桥梁的限制。大型道路通常可承载 40t 的运输, 但在小路上就降到 10t 甚至 7.5t 。对于横跨国家的输电网络, 道路的承载限定是项目规划或道路选择的一部份内容。

基本结构的架空线相对都较轻。轻质铁塔和铝绞线能适应大多数路面的承载能力。

GIL 的铝管相对较轻。典型的重量是每米 40kg , 10m 长的 GIL 有 400kg 。运送直径为 500mm 的 GIL 时, 通常的卡车可以运输 6 根管道和导电杆, 总重量约 2.4t 。这个重量能适应大多数的道路的承载。

常用的 420kV 电缆，每盘电缆的长度在 300 ~500m。每米电缆的重量约 40kg，这样每盘的重量范围在 12 ~20t。这个重量要求相对结实的道路来运输。因此，产品的重量也是每个项目规划的重要内容。

8.4.3 最大体积

对于狭窄的道路，急转弯或靠近路边的建筑，货物的体积也是一个重要的考虑因素。架空线的铁塔可以分解成小尺寸的钢结构，导线也可以分成几个小盘。这样导线都相对较轻。

大截面的电缆都是采用几米直径的电缆盘来装载的。这些电缆盘需要能通过桥下、通过隧道或架空线、跨过铁路。

GIL 管道可分成几个小尺寸的元件，如 500mm 的外壳。GIL 的管道的长度也可以减少到较短的长度，如 10m。但短的 GIL 需要较多数量的管道并要求有更多的焊接段。

总之，输电路径上所能采用的最大运输尺寸是项目规划中的一个重要因素。

8.4.4 土壤的类型

覆盖在 GIL 路径上的土壤，以及现场工作场地的大小，对所选择设备的型式有着巨大的影响。软土壤，如沼泽地，与岩石或粘土层的要求有很大的不同。按照现场的具体工作，最方便的就是架铁塔和安装架空线线路。但 GIL 和电缆在这方面的运用都是有局限性的，如前几章所述。

土壤的影响可以对输电线路的造价产生额外的影响。现场土壤问题的解决也是每个项目规划中的重要课题。

8.4.5 运输道路

对于需要从制造厂送到现场的设备元件来说，长距离的道路或铁路对于元件的尺寸、重量都有限制。对于制造和装配过程来说，架空线的元件满足大多数道路的运输条件。但若运输道路较小，对于项目的投资还是会有影响。

电缆通常是在大型电缆厂制造，并用盘卷的型式送到现场。为减少电缆接头，电缆盘都是有数十米电缆盘成一卷。电缆厂通常不能搬到项目的所在地。

GIL 由工厂里的焊接或挤制设备及绝缘件设备来加工制造。绝缘件体积不大并容易运输。挤制铝管的制造通常在有大型挤制设备的工厂进行。这些设备不便于运输到项目所在地。但螺旋焊管的设备可以用几周的时间就运输到工地并进行组装。这些都给在项目现场进行 GIL 管道生产提供了可能性，减少了运输成本。

8.4.6 现场车间的尺寸

现场车间是输电线路安装和敷设的临时场地。架空线不需要太大的现场工作场

所，大多数情况下都没有限制。电缆在现场的施工主要是 300 ~ 500m 的电缆段的连接。需要在现场有专用的工作场地来进行数周的连接工作。

GIL 主要在现场装配，这样就需要一个安装车间。安装车间的大小通常是每根母线长度的 2 倍，约需要 30 ~ 40m 长、20m 宽的场地。安装车间通常靠近工地并采用帐篷型式来敷设 GIL。每公里长的 GIL 需用车间 2 ~ 3 个月，然后再转移到下一个施工场地。若铝合金管道也在现场制造，这还需要第二个同样大小的帐篷。

现场施工场地的大小和靠近路径也是项目规划的一部分，并对安装过程和成本都产生重要的影响。

8.5 软特性

8.5.1 概述

通常，新建一条输电线路都不容易获得批准。在欧洲、北美和亚洲的部分国家，公众的反对意见对项目的成功或项目的其他方面都有着严重的影响。这些软特性有时是有价值的，但是大多数和公众的情感有关，并且常常被政客或公众用于自己的目的。大多数情况下，这些目的影响到最终决定。

8.5.2 美学

什么是好看的？什么是美丽的？

每个人都有自己的观点。有人感到架空线是一个美好的结构，其他人则坚决反对架空线，但可以接受风车。大多数人都接受架空线，但这不能建在他们的后院。

这不是新问题，但公众的意见在今天或许以后都有重要的影响。当问起输电线路的美学要求，最好的答案是隐形的。

GIL 和电缆的隐形输电技术需要地下的隧道来保证隐形。这些隧道的开挖，即使是临行的，都会引起讨论，原因是施工后会对现场的地貌产生变化。这些改变都会引起对项目路径规划的讨论。

无论怎样，从美学的方面来看，地下输电方案比架空线得到认可的机会更多。

8.5.3 隐形

在公众和政府的审批程序中，“眼不见，心不想”是一个备受争议的问题。和燃气输送网络相比，它和输电管道的尺寸相当，架空线的讨论更为集中。气体管道输送天然气几千公里都是埋在地下的，都是隐形的。

对于新建的输电线路，公众对于可见性的讨论是很强烈的，这对项目的规划和审批都有显著的影响。

8.5.4 噪声

输电系统上有两种类型的噪声,一种是高压架空线在特定天气下的电晕放电产生的,另一种是机器和设备在安装阶段产生的噪声。

电晕放电的噪声和架空线有关,这种在特定天气下的噪声,在靠近架空线时可以听到。当架空线靠近居民区域时,就会引起公众的反对。

来自安装和敷设地下电缆的噪声主要和隧道开挖工作有关,这里需要转移大量的土壤。首先土壤要从隧道中取出并储存,然后经过循环和过滤再用于回填隧道。对每个输电线路来说,这个过程要持续数月。

这些噪声和运输方面的问题,也对项目的规划和造价产生了影响。

8.6 经济性

成本因素是一种技术能否成功的最重要的因素。GIL 经过重新设计,采用混合气体和管道敷设技术,适用于长距离的地下输电,这个成本已经下降了 50%。这使得在未来有着更广阔的应用。同时,电缆和架空线技术也在不断地进步,这些都能带来投资成本的节省。

和架空线相比,在 420kV 和 550kV 的电压等级,采用地下输电的 GIL 和电缆的投资都比较高。但当电压升至 800kV 或 1000kV, GIL 的投资和架空线就很接近。这也比较容易理解,由于 420kV 或 550kV 的架空线的铁塔高度有 30 ~35m,采用 4 分裂的导线,但到了 800kV 或 1000kV,铁塔高度就升到 60 ~80m 高,采用 8 到 10 分裂的导线来满足最大场强要求。然而,对 GIL 来说,420kV 和 550kV 的 500mm 的管道,仅加大到 630mm 就可以满足 800kV 和 1000kV 的系统的输送能力。电压升高了一倍,但外径仅少量的增加。

由于巨大的可再生能源来自近海和沙漠,这就在全球范围内需要 800kV 和 1000kV 的输电系统^[118]。对不同输电系统投资的差异只能给出粗略的导向,不同的项目会有差异。

一个 420kV 或 550kV 的 GIL,其成本比架空线大概高 6 ~8 倍。对于 800kV,这个成本系数降到 3 ~4 倍,而对于 1000kV,可以预期仅是 2 ~3 倍。但这仅是初期投资的比较,没有包括 GIL 的运行优势,如线损、可靠性、可用性、维护和传输能力等方面的优势。

对于 420kV 的电缆和 GIL,其成本主要由传输能力来决定。若电缆系统采用双拼电缆, GIL 就有成本的优势。每个电缆系统的传输能力为 1800MVA。

第9章 输电管道

世界范围的海上风电的发展，主要在欧洲北海地区的几个大的风电场。在欧洲，潜在的风电所提供的电力要大于所需要的电力消耗。问题是不是所有的地区都容易进入，并且设备安装的费用也很高。过去，海上风电都靠近海边（如距离 5 ~ 10km 远）。但现在和将来的发展，海上风电将建在离岸边 50 ~ 200km 远的海上。输电系统的连接在 60km 以下是电缆，当输电距离增大时，采用直流换流站以及直流电缆^[24,150,153,160,187,188]。

采用 GIL 来连接海上风电的方式，可以将大量的风电能源（如 8GW）在近岸上汇集并通过在陆地上称为输电管道（PTP™）^[171]⊖ 的 GIL 的隧道系统将电能送出。来自德国的机构如欧登堡大学^[175]和汉诺威大学^[189]的技术支持中心 ForWind、位于慕尼黑的专注于隧道和管道的工程咨询公司 ILF 和位于埃朗根根的西子输配电部门^[191]的咨询机构，已经在欧盟的赞助下开展了对风电的这方面的研究。这些研究的赞助者是位于布鲁塞尔的欧盟的欧洲电网委员会和柏林的德国联邦经济发展委员会^[193]作为国家的机构进行赞助的。

图 9.1 是建立在北海上的其中一个大型的海上风电场，大约离丹麦的海岸线有 10 ~ 20km。发出的电能通过 33kV 的电缆汇集到海上平台，再通过 130 ~ 150kV 的海底电缆输送到陆地电网的连接点。图 9.2 是从 2.3MW 的风机采用 33kV 电缆汇集到海上平台，通过 33 ~ 132kV 变压器和中压和高压开关，通过 132kV 的电缆从海上平台连接到陆地上的电网。



图 9.1 海上风电场，Horns Rev，
丹麦：2.3MW 的风机



图 9.2 海上风电场，丹麦的 Lillegrund：
海上风电的汇集平台

海上风电的风机技术来源于陆上风电技术。采用可靠的三螺旋桨型式，面临的

⊖ PTP™ 是西门子子公司输电管道的注册商标。

主要问题是海上的强风和盐雾的腐蚀。有了风机上齿轮和轴承上的防腐蚀技术,风机的技术提高的很快最终解决了这一问题。如今,海上风电技术已经很可靠,并能安装在距离海岸线较远的场所。

在最近几年已经成功地安装了数百台的风机,并且还有数百台在等待安装。在阿尔法文图斯的风机已由 2.3MW 提高的 6MW,在英国已有 7MW 风机的应用,或许几年后会提高到 10MW。

风机上采用了航空方面的螺旋桨的顶尖技术和发电和输电领域的新技术。如今安装的海上风电的风机包含了顶尖科技,如图 9.3 所示。

大型海上风电到陆上电网的连接瓶颈是陆上的连接点。单个风电场的容量如今是 50~500MW,过几年将增大到 1000MW。北海的风电容量将超过 3000GW,这就需要几百个陆上电网的接入点。PTP 设想采用风电输送的集中化和采用强大的隧道系统的交流 GIL 来输送电力。如图 9.4 所示的 GIL 的隧道。



图 9.3 2.3MVA 的风机



图 9.4 隧道内的 GIL

9.1 可行性研究

“基于欧洲海上风电的北海电网的 GIL 的电力传输技术的可行性研究”,是欧洲电网^[118]的研究课题之一,正在研究的课题有:

- 北欧海上风电的发展(潜在的风电的分析,所需的电网的传输能力);
- 采用 PTPTM 技术的海上风电的传输(海上风电的 GIL 应用的适应性,安装技术);
- 大量风电的并网问题(并网的可行性,电网瓶颈和过负荷的模拟);
- 经济性和环境的影响。

这些课题的可行性的研究从 2006 年 10 月持续到 2009 年 9 月。

欧洲海上风电的发展对电网的发展是一个巨大的挑战。几百 GW 的电必须由海上输送到陆地的电网上。由于一些海上风电位于远离海岸线 100km 的海上,需要采取相应的措施来解决电网的并网问题。陆上电网的 GIL 的应用积累了很多经

验，但对于海上风电的需要，还需要进行一些研究，这些研究变成了推动欧盟开展可行性研究的动力。PTP™技术是面向未来的新产品，来源于输油和天然气管道的技术，使用 GIL 来作为传输的介质。PTP™可以理解为电力传输的完整系统。这个系统包括了各个海上风电的并网平台以及采用隧道技术的输电系统的安装技术。GIL 是用于电力输送的 PTP™的一部分。PTP™是 GIL 在海上技术上的增强部分。

9.2 欧洲海上风电

欧盟希望到 2020 年能减少 20% 的 CO₂ 的排放。为达到这一目的，欧盟正在加强海上风电的发展。当前，海上风电在丹麦、英国、荷兰和瑞典已经有了长足的发展。这些国家，海上风电将建在北海上。经过长期的发展，在荷兰、英国和德国的沿海将会集中很多的电能（见表 9.1）。总容量超过 7000MW 的海上风电已经在欧洲范围内得到批准。更多的后续项目，容量约 45450MW 的海上风电正在批准的程序中。这些项目合计，将相当于 2006 年采用化石燃料的电厂的发电能力 98000MW 的大半^[200]。

表 9.1 北海地区的海上风电的名义装机容量（截至 2008 年 10 月）

国家	合计	已运营	已批准	待批准	建设中	未批准	未明确
比利时	1246	0	330	0	300	200	416
丹麦	360	160	0	0	200	0	0
德国	62762	9	5407	20637	60	0	36649
法国	195	0	105	0	0	0	90
荷兰	25285	228	0	24476	0	581	0
英国	6115	340	1500	340	472	108	3355
合计	95963	737	7342	45453	1032	889	40510

电网规划的发展说明新的电网的连接必须沿着已发展和批准的海上风电的规划来发展。这就要求输电网络可以在长距离上高效地输送大量的电能。在北海的一些区域，例如德国沿海和在“瓦登海”，架设架空线的空间非常有限。自然保护区、运输通道和其他重要的区域，如捕鱼和观光的地区都必须考虑。另外，还要考虑电能传输的低损耗和高效，这都需要通过使用空间的集中来使用最小的区域来传输电力。这就包括环保的安装方法来缩小使用上的冲突。

当采用 PTP 技术时，海上风电的电能汇集原理如图 9.5 所示。将各个风机的输出电力进行汇集并传输到陆上电网，然后再传输到负荷中心。

9.3 海底隧道系统

海底隧道系统 PTP™ 如何能将外海上的风电场所发的大容量的电力传输到陆

地上？

这可以使用输电模型来进行说明：在北海的沿岸，输电线路需要将几个风电场连接后，送出 8000MVA 的电能。图 9.5 是一个连接了 C1、C2 和 C3 电站平台到一个虚拟的陆上汇流点的 PTP™输电回路的图形。海上风电的电能通过海底电缆送到 PTP™的汇流平台，PTP™的管道系统再将电能送到岸上系统。岸上的电站（O）通过电网连接到 PTP™。然后电能可以通过交流或直流方式送到负荷中心。

这个模型可以详细分解为以下几方面：单个风电连接到风电场。功率 400 ~ 500MVA 的风电场通过海底电缆连接到 PTP™的汇流平台，电能再从汇流平台传输到岸上的电站（O）。从那里再送到负荷中心。

这个技术概念的核心是需要有装有 GIL 的隧道，该隧道将汇流平台 C1 和陆上电网连接在一起。在有生态影响和敏感区域，如受保护的瓦登海，在海底挖掘了一个双隧道。图 9.6 给出了陆上变电站和海上汇流平台 C1 连接回路的方案图。

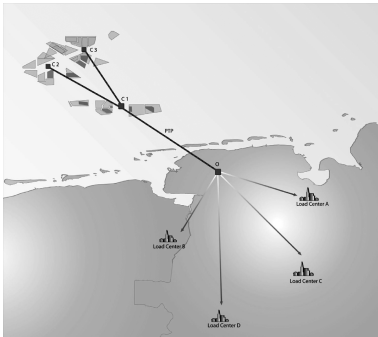


图 9.5 连接汇流点的 PTP™示例

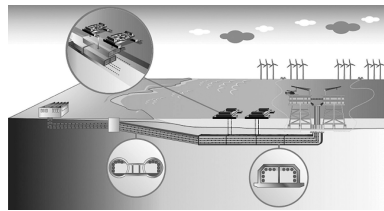


图 9.6 带有 PTP™的海上风电的连接方案图

PTP™海上系统包括：

- 作为电力传输的一次设备 GIL
- GIL 的二次设备，如监控系统
- 隧道等建筑，以及包含设备的平台等。

为什么使用 GIL 作为海底隧道的传输系统？

传统的 GIL 技术是用在变电站或电厂的，主要是在从 400 ~ 800kV 的电力传输。其三相系统所能传输的电能量范围是 2000 ~ 4000MVA。内部带压力的混合气体组成可靠绝缘系统。GIL 是单相的，内部同心结构的铝导体用以承载高电压的交流电。总的来说，GIL 由两部分管道组成：位于接地外壳管中心的内部导电管。导电管由一些环氧树脂制成的绝缘子来支撑。导体和外壳的空间充有 N_2 和 SF_6 组成的混合气体。外壳是由铝合金的螺旋焊管制成（见图 9.7）。挤制的铝管用于导电管的材料，其包含了纯度 99.99% “电气” 纯铝。导体和外壳是在现场焊接在一起的，这样形成了一个密闭的气室，该气室在整个寿命期内不需要补充气体。整个回

路大约每 1km 分成一个气室，这样可以限制由于损坏而造成的漏气事故。采用 90°角以下的弯头来改变回路的走向。

气体绝缘的管道通常安装在隧道中，外壳涂敷了防腐保护层后也可以装在地上或直埋在地下。GIL 也可装在地上的钢支架上。对于海上风电的应用，PTP™已经开发了两种可行的隧道安装技术。

GIL 的电气特性 GIL 在其结构上有着自己独特的电气性能。由于采用了大截面的导体，其线损非常低，这对长距离输电有着重要的意义（参见图 9.5）。GIL 外壳完全接地，其外部的磁场非常低，也不存在外部的电场。GIL 坚固的金属外壳，对于运行和人员的安全也非常高。对于静态的输电系统，GIL 在整个寿命周期内，仅需少量的维护，具有高度的运行安全性能。

GIL 的技术参数

- 电压：400 ~ 800kV
- 传输功率：2000 ~ 4000MVA
- 材料：铝合金管
- 外壳直径：500 ~ 630mm
- 绝缘介质：0.7 ~ 0.8MPa 的混合气体
- 重量：30 ~ 40kg/m

电气性能：

- 长距离的高传输功率
- 大直径导体带来的低线损
- 很低的磁场
- 完全接地的外壳
- 全金属封闭，具有很高的运行和人员的安全可靠性。

图 9.8 是双孔隧道的剖面图，可以安装输送能力为 8000MVA 的四回 GIL 系统。

PTP™敷设技术 需首先完成隧道的建造。随后要安装 GIL。隧道的功能要提供电源、通风、监控和通信系统，以及运输系统。运输系统要满足在长距离隧道中的 GIL 在安装和今后维护阶段的 GIL 的运输。考虑到运行和安全的原因，隧道要建成至少是双孔的结构。

采用移动矿用隧道掘进设备来建造隧道 取决于地质和水利地质环境。可采用



图 9.7 装在隧道中的 GIL，
两个三相系统

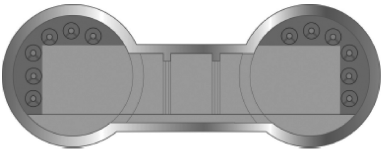


图 9.8 传输 8000MVA 的 PTP™的
双孔隧道的剖面图

盾构机（TBM）来准确地开挖隧道。其基本原理就是隧道在外壳的保护下逐渐挖成。整个隧道管道由线性排列的防水的混凝土外壳单元（管道形式，见图 9.8）构成。使用运输系统将材料、设备和机器由隧道入口运入隧道。挖掘出来的材料沿同样的路径带出隧道。采用这种构造技术，不再需要如竖井等临时构造。

双孔结构的隧道的优势如下：

- 通常使用盾构机来开挖封闭式的隧道，如世界上通行的交通隧道就是这种构造。

- 下沉式隧道方式，该技术是当前海上建筑技术的一部分。

所谓的“沉管构造方法”就是采用预制的高强度的混凝土制成的一个个的隧道元件，这些元件放置在海上的干式或浮动平台上，再沉入海底。该方法允许同时制造多个隧道的管道。各个管道采用纵向头尾相接的方法逐个沉入海底，每个管道上都有隔离盖板。采用拖船将这些管道拖曳到低于海床的指定位置。运输过程中，管道的前端在水密的隔室中进行了密封。运到了目的地后，管道元件将沉降在海床上的沟道内。在这些管道上已经安装了防水的连接元件。管道下沉时安装了重物以消除浮力的影响。最后，每个管道元件都有重物箱来确保下沉。下沉过程中，重物箱内慢慢地将冲入水和泥沙，管道元件的重量逐渐加大，最终沉入海底。带卷扬机的浮筒船确保每段管道的定位（见图 9.9）。然后，这些管道将被泥沙和碎石覆盖。用压舱混凝土更换掉压舱水并加上岩石的封盖后，这个隧道将不再受浮力的影响，同时也安全可靠地不受其他外部因素的影响。

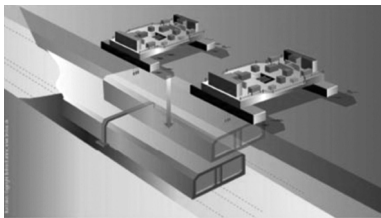


图 9.9 从浮筒船将隧道单元沉降到海底

GIL 将运送到完工后的隧道内。预组装好的 GIL 单元将运到陆地上的竖井，并用起重机将其送到竖井的底部。GIL 的各个元件在焊接帐篷内进行装配，焊接在一起然后送入隧道。GIL 可固定在滚轮支架或带滑动支撑的支架上，可以允许这些管道外壳有热膨胀。每隔一定的距离安装补偿单元，以消除 GIL 内部的导电杆的热膨胀。

9.4 海上和岸上 PTPTM构造

海上汇流平台 在海上汇流平台上，将汇集由 1600 台风力机产生的电能。输电电压会升至 400kV，500kV 甚至 800kV，这样所汇集的电能将由 4 个 GIL 系统输送到陆地上。海上汇流平台（见图 9.10）由三个平台组成：一个隧道连接平台和两个电站平台。用于海上石油和天然气的平台可以用于构造海上电站平台。

海上平台安装在由钢管支撑的钢结构，称为外套，两个电站各有 4000MVA 的

容量。每个平台分成三层甲板，主变和开关位于底部的两层。每个汇流过来 200MVA 的容量的电力采用 GIL 的传输方式。顶层的甲板是电站的服务设施，如运行人员的住宿、设备的控制和通信系统，安全系统等，还包括直升机平台和用于运行的其他设备。隧道连接平台——与电站平台连接的单元——靠自身的重力固定在混凝土平台上。

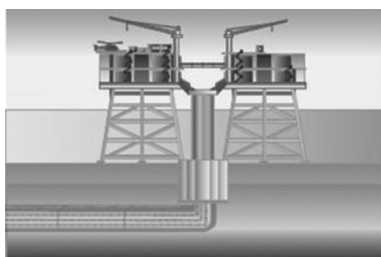


图 9.10 含变压器及其他设备的 PTP™平台

采用竖直的混凝土的管道将 GIL 从海底隧道通过两层钢支架与主变平台连接。

中间过渡竖井 从开挖的隧道到密封隧道的过渡，需要一个过渡的结构。这就是中间过渡竖井。过渡竖井既可以在水下密封也可以在水上留有入口。

陆上竖井 PTP™陆上竖井式用来作为离岸隧道到 PTP™岸上系统的过渡结构。对于陆上安装，可考虑采用直埋方式或者地上的支撑结构的安装方式。

主变电站 主变电站将所汇集的电传输到电网的接入点。由于传输强大的电能，可以考虑采用直埋式 GIL 作为输电方式。

项目完成的时间 在规划和批准的阶段，要考虑 GIL 的制造能力和运输。60km 长的隧道结构，包括变压器平台，以及 4 套 PTP™系统（8000MVA）的安装，预计该项目需要 10 ~ 12 年。

平台（8000MVA）

- 深度：35m
- 重量：2 × 7000t
- 平台支撑高度：50m

平台的结构尺寸

- 高度：25m
- 宽度：40m
- 长度：60m

9.5 下一代技术

由于材料的特性，在海水环境下安装的铝制的 GIL 需要放置在一个铸钢的管道内。在安装在海水里的 GIL，需要采用保护外壳来防止 GIL 的损坏。可将铝外壳的 GIL 放入作为保护的钢外壳内。作为海上油气工程的海上管道，图 9.11 管道中的管道的离岸敷设系统采用了管道敷设船来敷设管道。因此，可将装配好的 GIL 和保护外壳装在船上。在敷设期间，最困难的要求是敷设期间对外部环

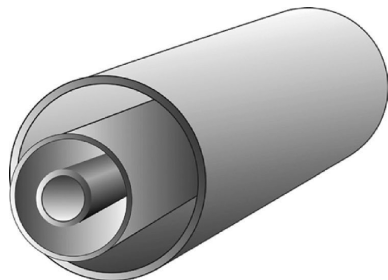


图 9.11 管道中的管道的离岸敷设系统

境的考虑。除了敷设、焊接以及各类管道的连接工艺以外，必须在施工中考虑材料的特性。由于这种极端复杂的“管道中的管道”的系统的敷设、运行和维修技术将在可见的将来有需求，这种概念目前被认为是未来的方案（见图 9.11）

9.6 海上环境

北海地区是被密集使用和占用的区域。该地区有着最繁忙的货物运输线，还有密集的自然矿产资源（石油和天然气产业，沉积物的提取）以及其他经济产业，如捕鱼、海洋养殖和旅游观光。由于可供开发的海区有限，这就自然和海上风电的发展产生冲突。

侵占海底区域导致了更多的冲突，特别是对于生态敏感的区域和自然保护区，像瓦登海，国家公园和自然 2000 区域。在此，国家和国际的对环境的保护条令是生效的，这些对离岸风电的规划也产生重要的影响：

- 植物 - 动物 - 栖息地条令（FFH - RL: 92/43EGW）^[11]
- 鸟类保护条例（V - RL: 79/409/EWG）^[194]
- 欧盟未来海上战略框架条令
- 国家法令

基于这些原因，在瓦登海域，可以避免或减少侵入水平的集中输电的概念对该区域的环保和合法的规划非常重要。对于有大量的发电量并需要送出，而由于环保和其他限制条件，该地区的电力输送通道的大小受到限制的地区，PTP™ 方案提供了一个实用的解决方案。每个 GIL 系统可以传输的 2000MW 的电能，从而每个 PTP™ 系统的能力传输直到 8000MW，仅需少量的强大的电力输送通道，就可将电能集中输送。

在海边的区域，特别是一些敏感地区（如瓦登海国家公园），采用盾构隧道敷设 PTP™ 系统的方式，是一个解决方法。在陆地上，仅需要有一个入口来将盾构设备放入隧道中。完成土建结构后，这个入口几乎看不到。在第 1 章介绍的输电线路的模型，第一个离岸汇流平台位于远离海岸线 60km 的海上，在海岸线上，看不到东弗里西亚群岛。该地区的海上的风景照片仍保持原貌。

在敏感地区以外的地方，可用下沉预制的隧道元件（沉管法）来完成隧道。需要采用大型敷设船将所需的材料从港口运输到目的地。根据底层的土壤，当冲刷隧道区域时，海底的沉积物形成漩涡并上浮，然后下沉并对接管道单元，这样会导致该地区的鱼类和其他海洋哺乳动物逃离该施工区域。同样的问题，施工所产生的振动和噪声会损害当地的鱼类和哺乳动物（在运输线路和靠近海上平台的地区）。当完成海底铺设后，受影响的栖息地的鱼类和海洋哺乳动物将会再繁殖起来。

海底沉积物可用多种方式来运输。采用盾构方式开挖出来的沉积物可用施工船来运走，当采用沉管法，可用施工船来装载海底的沉积物。

第 10 章 结 论

气体绝缘输电线路（GIL）是可以安装在地上、沟渠、地下隧道或直埋的大容量输电技术。该技术发明于 20 世纪 60 年代，首次工业应用是 1974 年在德国施卢赫湖抽水蓄能电站的 400kV 输电系统。从那以后已经有超过 300km 单相长度安装并运行于世界各地。在 GIL 完成第一步发明以后，2001 年，瑞士日内瓦 PALEXPO 项目的 N_2/SF_6 混合气体技术以及现场焊接连接技术在隧道中的首次应用代表了长距离第二代 GIL 应用的开始。2010 年法兰克福国际机场克尔斯特巴赫项目为直埋式第二代 GIL 的首次应用。

目前 GIL 应用于全世界很多需高可靠性以及高可用性的大容量输电项目，项目的大小持续增加：从过去典型的数百米的系统长度到现在的数公里。这是十倍的增长。将来随着可再生能源的发展会实现长达数十公里的输电线。

GIL 技术以建立在环氧树脂绝缘件和铝外壳上的气体绝缘为基础。这种简单设计在过去 35 年的应用中证明是非常可靠的。设计、例行试验以及现场装配令人信服的质量保证系统是高可靠性的基础。

在全球全部工程（300km 单相长度以上）过去 35 年的运行中未得到重大事故的报告，这是可靠性的优秀收获。

不同的敷设方法有地上钢结构、隧道或沟渠、以及直埋敷设，给变电站、电厂甚至野外安装提供了多种备选方案。高压 GIL 的高安全性允许我们把 GIL 与铁路、公路等交通隧道结合在一起。此外，把 GIL 安装在桥梁上也是可行的，因为 GIL 具有刚性外壳，GIL 很容易安装在隧道或桥梁中。

隧道安装或直埋 GIL 的长期试验证明了大型项目的现场可行性，也对气体绝缘输电线 50 年寿命的优秀的长期稳定性提供了依据。从系统和电网角度来看，GIL 可以应用于 400kV 及以上的大容量输电网。有了 500kV、800kV 甚至 1200kV GIL 的解决方案，大容量输电的高端可以达到。为了实现大容量远距离输电，特高压是最佳选择。

从环境角度来看 GIL 提供了若干优点：安装于地下不可见、输电损耗低、电磁场非常低、对周围设备和人员有非常大的安全性。用作绝缘气体的 SF_6 气体不可以排放到大气中，它的正确处理是重要的运行问题。从安装角度来看第二代 GIL 完全焊接的设计是气密的。气体的正确处理是由国际标准规定的且是必须执行的。这可以把释放到大气中的气体减少到可以忽略的最小值。

与其他输电系统相比，GIL 的主要优点是长距离输电能力，简单地说是：“容量越大、电压越高、用 GIL 越好”。

400kV2000MVA、500kV3000MVA、800kV4000MVA 或 1000kV6000MVA 的三相系统为典型值。气体绝缘输电系统的低电容允许在长距离不需要补偿。在 400kV 电压等级的典型长度为 60 ~80km，取决于当地电网条件。

GIL 新的应用场合为 GIL 与道路或铁路隧道或桥梁的结合；同时 GIL 与高速公路和铁路的结合也是可能的；或者作为小走廊内集中地下输电系统。连接大型海上风电场以及在海岸上很小一个区段也是 GIL 在未来的应用之一。

从 35 年 GIL 积累的积极经验来说，这种技术已经为解决未来大容量输电问题作好准备。

参 考 文 献

- [1] George G., Interconnecting the globe, *Transmission and Distribution World*, 01/2000.
- [2] Li F., Haubrich H.-J., Bewertung von Netzausbaumaßnahmen zur Engpassbeseitigung im UTCE-Verbundnetz, *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, 56. Jg., 2006.
- [3] Giebel G., Nielson H., Hurley B., Bigger transmission distance v lower load factors: the European dilemma, *Modern Power System*, 10/2005.
- [4] Rajgor G., Big Hike upwards for five year forecast, *Windpower Monthly*, 05/2008.
- [5] Koch H., Underground cables and gas insulated transmission lines, *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering* (Webster), 2006.
- [6] Koch H., *Gasisolierte Übertragungsleitungen (GIL) für hohe Übertragungsleistungen*, ETG-Tagung, Zürich, Schweiz, 05/2000.
- [7] Koch H., Kumar A., Christl N., Lei X., Povh D., Retzmann D., Advanced Technologies for Power Transmission and Distribution – Benefits and Impact of Innovations, Siemens Brochure, 2010.
- [8] Klein J., Hochspannung im Rohr – Neue Übertragungsleitungen revolutionieren die Stromversorgung, DMT-Innovativ spezial, 09/2001.
- [9] Koch H., Gas-insulated transmission line (GIL), in J. McDonald (ed.), *Power Substations Engineering*, CRC Press, Boca Raton, FL, 2003.
- [10] Koch H., Pöhler S., Schmidt S., Anwendungsvorteile von gasisolierten Übertragungsleitungen (GIL) für unterirdischen Energietransport in Ballungszentren, etz 1-2/2002.
- [11] Flora-Fauna-Habitat Directive (FFH-RL: 92/43/EWG). http://ec.europa.eu/environment/nature/legislation/habitatsdirective/index_en.htm.
- [12] Zimmer C., Eckenroth L., Feldmann J., Jones W., Elms N., Riechmann C., Schlecht D., Cremer D., Haubrich H.-J., Weiterentwicklung des grenzüberschreitenden Engpassmanagements im europäischen Stromnetz, *Energiewirtschaftl. Tagesfragen*, 54. Jg., Heft 12, 2004.
- [13] Pöhler S., Koch H., Anwendungsmöglichkeiten der GIL im europäischen Verbundnetz, ETG von Electrosuisse, Fribourg, Schweiz, 01/2004.
- [14] Koch H., Auswirkungen der gasisolierten Leitungen (GIL) auf das Energienetz, ETG-Kongress 2003, Hamburg.
- [15] http://de.wikipedia.org/wiki/Cahora_Bassa August 2011.
- [16] <http://de.wikipedia.org/wiki/Itaip%C3%BA> August 2011.
- [17] http://en.wikipedia.org/wiki/Pacific_DC_Intertie August 2011.
- [18] Liu Q., Lu Q., Rehtanz C., Vereinigte Netze, ABB Technik, 02/2005.
- [19] <http://cn.siemens.com/cms/cn/English/PTD/products/references/utility/Pages/Gui-Guang.aspx>
- [20] <http://www.ptd.siemens.de/artikel0605.pdf>
- [21] Povh D., Pyc I., Retzmann D., Weinhold, Future Developments in Power Industry, The 4th IERE General Meeting and IERE Central and Eastern Europe Forum, Krakow, Poland, 10/2004.
- [22] Povh D., Retzmann D., Rittiger J., Benefits of Simulation for Operation of Large Power Systems and System Interconnections, IERE General Meeting, San José, Costa Rica, 11/2003.

- [23] Koch H., Innovative Trends in the High Voltage Field, IEEE PES Substations Committee Meeting, Bellevue, WA, 04/2007.
- [24] Lange B., Hahn B., Offshore-Testfeld Borkum, Nachhaltig Wirtschaften, 01/2007.
- [25] Koch H., To solve bottle-necks in the European Transmission Net, IASTED, Benalmádena, Spain, 06/2005.
- [26] Koch H., AC Bulk Power Systems in Metropolitan Areas Application, IEEE/PES T&D Asia Pacific, Dalian, China, 08/2005.
- [27] Koch H., Schoeffner, G., Gas-Insulated Transmission Line – To Solve Transmission Tasks of the Future, IPEC Conference, Singapore, 05/2003.
- [28] Koch H., Gas-Insulated Transmission Line (GIL), Chapter 18 of *Electric Power Substations Engineering*, 05/2003.
- [29] Jahnke B., Hanse S., Energy transmission in Ballungsräumen mit Höchstspannungskabeln bis 400 kV, *Elektrizitätswirtschaft*, 12/1992.
- [30] Pedersen W., Doepeke K., Brolin R., Development of a compressed gas-insulated transmission line, *IEEE Power*, 1970.
- [31] Abilgaard E., Zur Verlegung SF6-isolierter Hochspannungsrohrkabel, Sonderdruck aus ENERGIE und TECHNIK, 1972.
- [32] Koch H., Magnetic Fields of Gas-Insulated Transmission Lines – Calculations and Measurements, ISH Conference 2003, Delft.
- [33] Koch H., Hillers T., Gasisolierte Hochspannungsleitungen erschließen neue Wege der Energieübertragung, ETZ, Heft 11, 1997.
- [34] Chakir A., Koch H., Gas Insulated Transmission Lines for High Power Transmission over Long Distances, UPDEA, Senegal, 04/99.
- [35] Bär G., Dürschner R., Koch H., 25 Jahre Betriebserfahrung mit GIL – heutige Anwendungsmöglichkeiten, etz, Heft 1-2/2002.
- [36] Hillers T., Koch H., Gas Insulated Transmission Lines (GIL): A solution for the power supply of metropolitan areas, CEPSE, Thailand, 07/1998.
- [37] Koch H., Erste qualifizierte gasisolierte Übertragungsleitung für Mischgas, ev-report, 03/1999.
- [38] Henningsen C.G., Kaul G., Koch H., Schütte A., Plath R., Electrical and Mechanical Long-Time Behaviour of Gas-Insulated Transmission Lines, CIGRE Session 2000, Paris.
- [39] Pedersen W., Doepeken K., Brolin R., Development of Compressed Gas-Insulated Transmission Line, 03/1995.
- [40] Thuries E., Girodet A., Roussel B., Guillen, Underground Gas-Insulated Transmission Line, Villeurbanne, *AEEE Journal* Vol. 7 08/1996.
- [41] Thuries E., Voisin G., 420–550 kV Gas Insulated Transmission Lines, Gec Alsthom Technical Review, 1994.
- [42] Schoeffner G., Neumann T., Application of Gas Insulated Transmission Lines (GIL) and Gas Insulated Switchgear (GIS) for Power Plants.
- [43] Koch H., Schoeffner G., Gas-Insulated Transmission Line – To Solve Transmission Tasks of the Future, IPEC Conference 2003, Singapore.
- [44] Koch H., Siemens Activities on the Development and Application of GIL, CIGRE SC23, Colloquium Venezuela 10/2001.
- [45] Koch H., Gas-Insulated Line (GIL) of the 2nd Generation, IEEE Conference AC/DC Power Transmission, 2001.
- [46] Koch H., Gasisolierte Übertragungsleitungen der 2ten Generation für das Hochspannungsnetz, e&i, Österreich, Heft 1, Jg. 119, 01/2002.
- [47] Koch H., Development, long duration testing and first application of Gas-Insulated Transmission Line (GIL), IEEE ICC Fall Meeting, 10/2000.
- [48] Siemens verwirklicht in Genf weltweit erste Hochspannungsverbindung mit gasisolierter Übertragungsleitung der zweiten Generation, Pressereferat EV, Erlangen, Germany, 2001.
- [49] Alter J., Koch H., Gasisolierte Übertragungsleitung (GIL) der zweiten Generation, *elektrizitätswirtschaft*, Jg. 100, Heft 8, 04/2001.
- [50] Koch H., Pöhler S., Schmidt S., Vorteile der Energieübertragung mit gasisolierten Leitungen (GIL), etz, Heft 6/2002.
- [51] IEC 62271-4: High-voltage switchgear and controlgear – Part 4: Use and handling of sulphur hexafluoride (SF₆), to be published 2012, IEC, Geneva, Switzerland.
- [52] Chakir A., Koch H., Numerische Untersuchung der turbulenten, natürlichen Konvektion in horizontalen, koaxialen Zylindern mit CFD Flotran-Ansys, CAD-FEM Users' Meeting, Bad Neuenahr, 10/1998.

- [53] IEC 60287 Electric cables – calculation of the current rating, IEC, Geneva, Switzerland, 2006.
- [54] IEC 62271-204. High-voltage switchgear and controlgear – Part 204: Rigid gas-insulated transmission lines for rated voltage above 52 kV, IEC, Geneva, Switzerland, 2011.
- [55] Koch H., Schoeffner G., Gas-Insulated Transmission Line (GIL) – An Overview, *ELECTRA*, 12/2003.
- [56] Eidinger, A., Aufbau, Einsatz und Erprobung von SF₆ Rohrgaskabel, Patent DE 19604485A1 Brown Boveri AG, Baden, Argau, Switzerland, 08/1997.
- [57] Schichler U., Diessner A., Gorablenkow J., Dielectric on-site testing of GIL, Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Nagoya, Japan, June 1–5, 2003.
- [58] IEC/TR 62271-303 ed1.0 (2008-07). High-voltage switchgear and controlgear – Part 303: Use and handling of sulphur hexafluoride (SF₆), IEC, Geneva, Switzerland, 2008.
- [59] Diessner A., Finkel M., Grund A., Kynast E., Dielectric properties of N₂/SF₆ mixtures for use in GIS or GIL, High Voltage Engineering Symposium, August 22–27, Conference Publication No. 467, © IEE, 1999.
- [60] Koch H., Preferential Subject D1 PS2 Q6: Is there any experience from the application in the field of N₂/SF₆ mixtures and especially in high voltage Gas-Insulated Lines?, CIGRE Session 2004, Paris, 08/2004.
- [61] Alter J., Ammann M., Boeck W., Degen W., Diessner A., Koch H., Renaud F., Pöhler S., N₂/SF₆ gas-insulated line of a new GIL generation in service, CIGRE Session, Paris, 08/2002.
- [62] van Brunt C., SF₆/N₂ mixtures basic and HV insulation properties, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 10/1995.
- [63] van Brunt C., SF₆ Insulation; possible greenhouse problems and solutions, Electricity Division, DEIS, 1996.
- [64] van Brunt C., Olthoff J.K., Green, Gases for Electrical Insulation and Arc Interruption: Possible Present and Future Alternatives to Pure SF₆, National Institute of Standards and Technology (NIST), U.S. Department of Commerce, Washington, USA, 11/1997.
- [65] Marsden S., Hopkins M., Eck C.R., Lightning impulse withstand performance of a practical GIC with 5 and 10 percent SF₆/N₂ mixtures, IEEE, Electrical Insulation, Conference Record, 06/1998.
- [66] Zende C., Pfeiffer W., Schoen D., Corona stabilisation and prebreakdown development in SF₆ inhomogeneous fields stressed with very fast transient voltages, 10th International Symposium on High Voltage Engineering, Montreal, Canada, 1997.
- [67] Hairour M., Bessede J.-L., Girodet A., Toureille A., Agnel S., Meijer S., Dielectric withstand of N₂, CO₂ in GIS, CEPIS, India, 2006.
- [68] Hoshina Y., Sato M., Murase H., Toyoda M., Kobayashi A., Dielectric properties of SF₆/N₂ gas mixtures on a full scale model of the gas-insulated busbar, IEEE, PES, Winter Power Meeting, New York, 2000.
- [69] Hoshina Y., Sato M., Murase H., Aoyagi K., Hanai M., Kaneko E., The surface flashover characteristics of spacer for GIS in SF₆ gas and mixtures, *Gaseous Dielectrics* Vol. VIII, Plenum Press, New York, 1998.
- [70] Boeck W., Taschner W., Luxa G., Menten L., Insulating behaviour of SF₆ without solid insulation in case of fast transients, CIGRE Session Paris, France, 1986.
- [71] Braun J.-M., Addis G., Diederich A., Girodet A., Long-term reliability of cast epoxy insulators in gas insulated equipment, CIGRE Session Paris, France, 1990.
- [72] Dießner A., Luxa G., Neyer W., Elektrische Langzeitversuche an Epoxidharz- Isolatoren in SF₆-isolierten metallgekapselten Schaltanlagen, *Siemens-Zeitschrift*, 1986.
- [73] Knobloch H., The comparison of arc-extinguishing capability of sulfur hexafluoride (SF₆) with alternative gases in high-voltage circuit-breakers, *Gaseous Dielectrics* VIII, International Symposium on Gaseous Dielectrics, Virginia Beach, VA, June 2-5, 1998.
- [74] Koch H., Experience with 2nd generation gas-insulated transmission line GIL, JICABLE Conference, Versailles, France, 06/2003.
- [75] Dießner A., Prinzipien und Prüfkonzeption für gasisierte Übertragungssysteme (GIL), *Highvolt Kolloquium*, Cottbus, Germany, 05/1999.
- [76] Koch H., Schuette A., Gas-Insulated Transmission Lines (GIL), type tests and prequalification, JICABLE, Versailles, France, 06/1999.
- [77] Kynast E., Koch H., Hochspannungstechnische Gesichtspunkte zur Entwicklung, Prüfung und zum Betrieb von gasisierten Übertragungssystemen, Micafil Symposium, Stuttgart, Germany, 09/1999.
- [78] Chakir A., Koch H., Transient thermal behavior of buried Gas-Insulated Transmission Lines (GIL) at variable loads, *ASME Journals*, Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exhibition, New York, USA, 11/2001.
- [79] Hillers T., Koch H., Gas-Insulated Transmission Lines (GIL): The solution for high power transmission underground, IEEE, PES Power Delivery Conference, Madrid, Spain, 08/1999.

- [80] Chakravorti S., Steinbigler H., Capacitive-resistive field calculation on HV bushings using the boundary-element method, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 04/1998.
- [81] Koch H., Long lengths high power gas-insulated high-voltage transmission line, *CIGRE Symposium*, Shanghai, China, 2003.
- [82] IEC 62271-1 ed1.0 High-voltage switchgear and controlgear – Part 1: Common specifications, IEC, Geneva, Switzerland, 2007-10.
- [83] EN 50052 Cast aluminium alloy enclosures for gas-filled high-voltage switchgear and controlgear, IEC, Geneva, Switzerland, 1986.
- [84] EN 50064 Wrought aluminium and aluminium alloy enclosures for gas-filled high-voltage switchgear and controlgear, IEC, Geneva, Switzerland, 1989.
- [85] EN 50068 Wrought steel enclosures for gas-filled high-voltage switchgear and controlgear, IEC, Geneva, Switzerland 1991.
- [86] EN 50069 Welded composite enclosures of cast and wrought aluminium alloys for gas-filled high-voltage switchgear and controlgear, IEC, Geneva, Switzerland 1991.
- [87] EN 50089 Cast resin partitions for metal enclosed gas-filled high-voltage switchgear and controlgear, IEC, Geneva, Switzerland 1992.
- [88] EN 50187 Gas-filled compartments for a.c. switchgear and controlgear for rated voltages above 1 kV and up to and including 52 kV, IEC, Geneva, Switzerland 1996.
- [89] Babusci B., Colombo E., Speziali, Assessment of the behaviour of gas-insulated electrical components in the presence of an internal arc, ENEL Research, CIGRE Session, Paris, France, 1998.
- [90] Chakir A., Koch H., Thermal calculation for buried Gas-Insulated Transmission Lines (GIL) and XLPE-cable, *IEEE Winter Power Meeting*, Columbus, OH, 01/2001.
- [91] Völcker O., Koch H., Insulation co-ordination for gas-insulated transmission lines (GIL), *IEEE Transactions on Power Delivery*, PE-102 PRD, 07/2000.
- [92] Holmberg H.-E., Gubanski S.-M., Motion of metallic particles in gas insulated systems, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 08/1998.
- [93] Chakir A., Koch H., FE-Berechnung der mechanischen Beanspruchungen von erdverlegten, gasisolierten Übertragungsleitungen (GIL), CAD-FEM Users' Meeting, Sonthofen, Germany, 10/1999.
- [94] Morcos M.-M., Manhatten K.-S., Srivastava K.-D., On electrostatic trapping of particle contamination in GIL systems, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 10/1992.
- [95] Dale S.-J., Particle trap with dielectric barrier for use in gas insulated transmission lines, Westinghouse Electric Corp., US Patent 4335268, 06/1982.
- [96] Chakir A., Koch H., Turbulent natural convection and thermal behaviour of cylindrical Gas-Insulated Transmission Lines (GIL), *IEEE PES Summer Meeting*, Vancouver, Canada, 07/2001.
- [97] Metwally I.A., Thermal and magnetic analyses of gas-insulated lines, *International Journal of Thermal Sciences*, THESCI-D-0800364, 2008.
- [98] Chakir A., Koch H., Numerical solution for a turbulent natural convection in cylindrical horizontal annuli, *ASME Journal of Heat Transfer, American Society of Mechanical Engineers*, 2000.
- [99] Chakir A., Koch H., Seismic calculations of directly buried gas-insulated transmission lines (GIL), *IEEE/PES T&D Conference, Asia Pacific*, Yokohama, Japan, 10/2002.
- [100] Koch H., GIL as a modern technology to transmit electrical power, *International Power Engineering Conference*, Singapore, 05/2001.
- [101] Poehler S., Gasisolierte Leitungen – bewährte Technik für umweltfreundliche Unterflurverlegung von Freileitungend in sensibler Landschaft, *Pressekonferenz Innsbruck, Austria*, 06/2001.
- [102] Kaul G., Waller R., Die gasisolierte Übertragungsleitung in der Entwicklung, *Elektrizitätswirtschaft*, Jg. 99, Heft 11, 06/2000.
- [103] Hennigsen, C.-G., Polser, K., Obst, D.; Berlin Creates 380 kV Connection with Europe, *Transmission and Distribution World Journal*, July 1998.
- [104] Engelhard G., Hillers T., Anwendung des Orbital-Reibrührschweißen von Aluminiumrohren, *Schweißtechnische Tagung*, Kassel, Germany, 09/2002.
- [105] Engelhard G., Hillers T., Orbital-Reibrührschweißen von Aluminiumrohren, *Schweißtechnische Tagung*, Kassel, Germany, 09/2002.
- [106] Chakir A., Koch H., Corrosion protection for gas-insulated transmission lines, *IEEE PEC Summer Meeting*, Chicago, USA, 07/2002.

- [107] Koch H., Gas-insulated Transmission Lines (GIL) for high power transmission, FIILE 2001 Conference, Paris, 03/2001.
- [108] Schöffner G., Becks M., Ollständiger Korrosionsschutz für gasisolierte Übertragungsleitungen, etz Heft 6/2003.
- [109] Peez G., Jakobs V., Wechselstromkorrosion an erdverlegten, kathodisch geschützten Rohrleitungen, 3R International, 36. Jahrgang, Heft 7/1997, Seite 325–330, 1997.
- [110] Buchholz B., Koch H., Power delivery of the future, *Middle East Electricity*, Dubai, Arabic Emirates, 11/2002.
- [111] Koch H., Kunze D., Monitoring system of gas insulated transmission lines (GIL), CEPPI 2006, Mumbai, India, 11/2006.
- [112] Bell D., Charlson L., Holliday R., Irwin T., Lopez-Roldan J., Nixon L., High Voltage On-Site Commissioning Tests for Gas Insulated Substations Using UHF Partial Discharge Detection, IEEE, PES, Power Engineering Review, 2002.
- [113] Koch H., Future aspects of gas-insulated transmission line (GIL) applications, CIGRE Colloquium, Zürich, Switzerland, 08/1999.
- [114] Miyazaki A., Takinami N., Kobayashi S., *et al.*, Result of partial discharge measurements in a long-distance 275 kV GIL, *Power Engineering Review*, IEEE, PES, 2002.
- [115] Luxa G.-F., Diessner A., Mosca W., Pingini A., High Voltage Testing of SF₆ Insulated Substations of Site, CIGRE Session Paris, France, 08/1986.
- [116] IEC 60060-1 High-voltage test techniques – Part 1: General definitions and test requirements, IEC, Geneva, Switzerland, 2010.
- [117] IEC 60270 High-voltage test techniques – partial discharge measurements, IEC, Geneva, Switzerland, 2000.
- [118] Feasibility study of a North Sea network using the GIL technology to connect European off-shore wind energy projects and for the trade of electricity “GIL – TEN for Wind & Trade”, 2005-E 197/05-TREN/05/TEN-E S07.63573, European Union, Commission of European Transmission Networks Electricity, Brussels, Belgium, 2005.
- [119] Tenne T: Netzanschlussregeln Hoch- und Höchstspannung. Stand: 5. Oktober 2010. http://www.tennetso.de/pages/tennetso_de/Transparenz/Veroeffentlichungen/Netzanschluss/Netzanschlussregeln/tennet-NAR2010deu.pdf
- [120] Tenne T: Netzanschlussregeln Hoch- und Höchstspannung. Stand: 5. Oktober 2010. http://www.tennetso.de/pages/tennetso_de/Transparenz/Veroeffentlichungen/Netzanschluss/Netzanschlussregeln/tennet-NAR_OS_2010deu.pdf
- [121] PSS®E: <http://www.energy.siemens.com/hq/en/services/power-transmission-distribution/power-technologies-international/software-solutions/pss-e.htm>
- [122] PSS®SINCAL: <http://www.energy.siemens.com/hq/en/services/power-transmission-distribution/power-technologies-international/software-solutions/pss-sincal.htm>
- [123] NETOMAC: <http://www.energy.siemens.com/us/en/services/power-transmission-distribution/power-technologies-international/software-solutions/pss-netomac.htm>
- [124] Oswald B., Vergleichende Studie zu Stromübertragungstechniken im Höchstspannungsnetz, Forwind-Zentrum für Windenergieforschung, Hannover & Oldenburg, Germany, September 2005.
- [125] Blaum H., Kirchesch P., Kox A., Osterholt A., Zuverlässigkeit von 400 kV gasisolierten Leitungen (Reliability of 400 kV Gas-Insulated transmission Systems), Elektrotechnik und Automation, Germany, 1996.
- [126] Blaum H., Kirchesch P., Kox A., Osterholt A., Zuverlässigkeit von 400-kV-gasisolierten Leitungen, Energietechnik, Germany, 1996.
- [127] IEC 62271-203 ed1.0 High-voltage switchgear and controlgear – Part 203: Gas-insulated metal-enclosed switchgear for rated voltages above 52 kV, IEC, Geneva, Switzerland, 2003-11.
- [128] C37.122 IEEE Standard for High Voltage Gas-Insulated Substations Rated Above 52 kV, IEEE, Piscataway, NJ, USA, 2010.
- [129] P1677 Guide for Application and User Guide for Gas-Insulated Transmission Lines (GIL), Rated 72.5 kV and Above, IEEE, Piscataway, NJ, USA, 2010.
- [130] CIGRE TB 260. N₂/SF₆ Mixtures for Gas Insulated Systems, CIGRE, Paris, France, 1996.
- [131] CIGRE TB 218 Gas Insulated Transmission Lines (GIL), CIGRE, Paris, France, 2008.
- [132] CIGRE TB 351 Application of Long High Capacity Gas Insulated Lines, CIGRE, Paris, France, 2009.
- [133] London Infrastructure Project St John's Wood – Elstree 400 kV Cable Circuit, ABB, Mannheim, Germany, 02/2002.

- [134] Gas insulated lines (GIL) – An innovative solution that respects the environment, Druckschrift, ALSTOM, Paris, France, 12/2002.
- [135] Binder E., Feeberger R., Alter J., Zilavec R., Schaltanlagen und Energieausleitung im PSW Limberg II, ew Jg. 207 (2008), Heft 16.
- [136] Koch H., Future needs of high power interconnections solved with Gas-Insulated Transmission Lines (GIL), PowerCon Conference, Kunming, China, 10/2002.
- [137] Cooksen A. Gas Insulated Cables, IEEE Transactions on Electric Insulation, page 859-890, 10/1985.
- [138] Graybill H.-W., Underground power transmission with isolated phase gas-insulated conductors, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 01/1970.
- [139] Garrity T.-F., Matulic R., Rhodes G., Installation and field testing of 138 kV SF₆ gas-insulated transmission line, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 09-1975.
- [140] Annual Report, Technische Universität Dortmund, Institute of Power Systems and Power Economics, 2008.
- [141] Chakir A., Koch H., Long-term test of buried Gas Insulated Transmission Lines (GIL), CIGRE Study Committee SC15-Symposium, Dubai, 05/2001.
- [142] Chakir A., Koch H., Long-term test of buried Gas Insulated Transmission Lines (GIL), IEEE PES Winter Power Meeting, New York, USA, 01/2002.
- [143] Kert, C., L'Apport de Nouvelles Technologies dans l'Enfouissement des Lignes Électriques à Haute et Très Haute Tension, Office Parlementaire d'Évaluation des Choix Scientifiques et Technologiques, 19. December 2001.
- [144] Furtner, F. Effizientere Energiepolitik und regionale Elektrizitätsversorgung durch die EU-Elektrizitätsrichtlinie, Dissertation Katholische Universität Eichstätt-Ingolstadt, 2006.
- [145] Feldmann D., Aucourt C., Boisseau C., Les câbles à isolation gazeuse, Liaison CIG, Journal Epure No. 48, Page 13-24, 12/1995.
- [146] Dießner A., Koch H., Kynast E., Schuette A., Progress in high voltage testing of gas insulated transmission lines, ISH Conference, Montreal, Canada, 06/1997.
- [147] Koch H., Gasisolierte Übertragungsleitungen – eine Übertragungstechnik für das 21ste Jahrhundert, ETG-Tagung, München, Germany, 10/1999.
- [148] IEC 60480 Guidelines for the checking and treatment of sulphur hexafluoride (SF₆) taken from electrical equipment and specification for its re-use, IEC, Geneva, Switzerland, 2004.
- [149] IEC/TR 62271-303 ed1.0 High-voltage switchgear and controlgear – Part 303: Use and handling of sulphur hexafluoride (SF₆), IEC, Geneva, Switzerland, 2008-07.
- [150] Global Wind 2007 Report, Global Wind Energy Council (GWEC), 2008.
- [151] Koch H., Gasisolierte Übertragungsleitungen (GIL) als Alternative zu Kabeln zur Übertragung elektrischer Energie in Ballungs- und Naturschutzgebieten, VDE-Kongress, Dresden, Germany, 10/2002.
- [152] Renaud F., 220 kV Gas-Insulated Transmission Line – Palexpo Geneva Switzerland, IEEE Power Engineering Society General Meeting, Toronto, Canada, 13–17 July 2003.
- [153] Valov B., Lange B., Rohrig K., Heier S., Bock C., 25 GW Offshore – Windkraftleistung benötigt ein starkes Energieübertragungssystem auf der Nordsee, Universität Kassel, *Wind Kraft Journal*, Ausgabe 01/2008.
- [154] Koch H., Environmental reasons for underground systems, CIGRE Session, Paris, France, 08/2002.
- [155] Koch H., EMV-Planung in der Hochspannungstechnik (EMC planning for high voltage technology), ELEKTRIE, Heft 48, 1994.
- [156] Benato R., Fellin L., Marzenta D., Paolucci A., Gas-Insulated Transmission Lines: excellent performance and low environmental impact, Proceedings International Symposium and Exhibition on Electric Power Engineering at the beginning of the Third Millennium, EPETM, Vol.1 pp. 385–405, Napoli, Italia, 12.–18. May 2000.
- [157] Benato R., Caldon R., Mari A., Paolucci A.: Analytical formation of the state matrix of a regulated power system accounting for upfc action, Proc. of 35th Universities' Power Engineering Conference – UPEC 2000. Queens University, Belfast Ireland, pp. 5. (ACI), September 2000.
- [158] VDE 0848. Safety in electric, magnetic and electromagnetic fields, DIN/VDE, Frankfurt, Germany, 2010.
- [159] Connor Th., Koch H., General aspects of electromagnetic fields for high voltage systems, ISH Conference, Delft, Netherlands, 08/2003.
- [160] Koch H., Offshore wind farms connected to the transmission network by GIL, Husum Wind Energy Conference Proceedings, Husum, Germany, 9–13 September 2008.
- [161] Sechszundzwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder - 26. BImSchV), Bundesministerin für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 16. Dezember 1996.

- [162] Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV), Bundesministerin für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 23 December 1999.
- [163] Tanizawa K., Minaguchi D., Honaga Y., Application of gas insulated transmission line in Japan, CIGRE Session Paris, France, 08/1984.
- [164] HAYASHI N., SAITOU H., SHIMOHIRO D., KAWAI T.; Chubu Electric Power Co. Inc.; Nagoya, Japan; KAWAI T.; Chubu Electric Power Co. Inc.; Japan; ISHII N.; The Furukawa Electric Co. Ltd; Tokyo, Japan; HIRASAWA T.; VISCAS Corporation; Tokyo, Japan; WATANABE M., NAKAGAWA T; J-Power Systems Corp.; Japan Construction of 275 kV underground transmission line composed of continuous 2,500m long cable, Jicable Conference Proceedings, Versaille, France, 2003.
- [165] Miyazaki, A.; Takinami, N.; Kobayashi, S.; Nishima, H.; Nakura, Y.; Komeda, H.; Nagano, H.; Higashi, H.; Chubu Electric Power Co.; Sumitomo Electric Industries, Ltd.: Long-Distance 275 kV GIL Monitoring System Using Fiberoptic Technology, IEEE, PES, Power Engineering Review, 08/2002.
- [166] Nojima, Shimizu, Araki, Hata, Yamauchi, Installation of 275 kV 3.3 km gas-insulated transmission line for underground large capacity transmission in Japan, CIGRE Session 1998.
- [167] Nojima T., Shimizu M., Miyazaki T., Study on an after-laying test for a long distance GIL, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 13, 07/1988.
- [168] Ashmore A., Electricity from the pipeline. Strom aus der Pipeline, Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke, 1997.
- [169] The longest gas insulated line installed in the world, ALSTOM, Brochure, 06/2002.
- [170] Neumann C., Erste erdverlegte GIL in Deutschland, Gasisolierte Leitung als Alternative zum Kabel, ew, Jg. 108, Heft 16, 2009.
- [171] Siemens AG, ILF Beratende Ingenieure, ForWind, Grid Connection of Offshore Wind Farms, A Feasibility Study on the Application of Power Transmission Pipelines (PTP®), Brochure, Siemens, Energy, Transmission, Erlangen, Germany, 2009.
- [172] Koch H., GIL – power transmission solution of the future, AEIC Conference 2006, Napa Valley, CA, USA, 09/2006.
- [173] Koch H., The use of traffic tunnel for electrical power transmission, PowerGrid Europe Proceedings, Madrid, Spain, 06/2007.
- [174] Koch H., Broader applications of GIL, CIGRE Session, Paris, France, 08/2002.
- [175] ForWind, das Zentrum für Windenergieforschung der Universitäten Oldenburg. <http://www.forwind.de/forwind/index.php>
- [176] Benato R., Carlini E.-M., Di Mario C., Fellin L., Paolucci A., Turri R., Gas-Insulated Transmission Lines (GIL) in railway galleries, IEEE PES Power Tech Conference, St. Petersburg, Russia, 27–30. June 2005.
- [177] Benato R., Brunello P., Carlini M., Di Mario C., Fellin L., Knollseisen G., Laußegger M., Muhr M., Paolucci A., Stroppa W., Wörle H., Woschitz R., Italy–Austria GIL in the new planned railway galleries Fortezza–Innsbruck under Brenner Pass, *Elektrotechnik & Informationstechnik*, Vol.: 123, pages: 551–558, 2006.
- [178] Koch H., Preferential Subject C2 PS2 Q2.5: Difficulties of adding new lines and expanding the transmission system, CIGRE Session, Paris, France, 08/2004.
- [179] Koch H., Preferential Subject C3 PS2 Q2.8: Trading low-carbon kWh certificates, to decrease greenhouse gas emissions, impact the electric power industry, in general, and the transmission activities, CIGRE Session, Paris, France, 08/2004.
- [180] Anders, G.-J., Rating of Electric Power Cables: Ampacity Computations for Transmission, Distribution and Industrial Applications, McGraw-Hill, Professional, 1997, 428 Pages.
- [181] Miller D., London Infrastructure Project, Electra No. 206, 02/2003.
- [182] Hänisch L., Hecklau D., Schroth R., Errichtung des 380-kV-Hochleistungskabelsystems in Berlin für den Verbundanschluß der Bewag, Elektrizitätswirtschaft, Germany, 07/1995.
- [183] Henningsen, C.G., 380-kV-Diagonale durch Berlin, Elektrizitätswirtschaft, Heft $\frac{1}{2}$, Seite. 42–43, 1997.
- [184] Genios Fachpresse Archive VDI Nachrichten, 380kV Kunststoffkabel soll die Versorgungssicherheit der Bundeshauptstadt erhöhen, Germany, 10. 01.1997.
- [185] Henningsen C.-G., Polster K., Obst D., Berlin creates 380-kV connection with Europe, *Transmission and Distribution World*, 07/1998.
- [186] Henningsen C.-G., Polster K., Obst D., Berlin's interconnection with Europe's power grid, the 380 kV diagonal link: A technical report, 50Hertz Transmission GmbH, Germany, 02/2010.
- [187] Keussen U., Schneller Ch., Winter W., Ergebnisse und Konsequenzen der “dena-Netzstudie”, *Energiewirtschaftl. Tagesfragen*, 52. Jg., Heft 4, 2005.

- [188] Koch H., Gas Insulated Transmission Line (GIL) – Application to connect offshore wind parks to the European network, The 8th International Power Engineering Conference, IPEC 2007, Singapore, 12/2007.
- [189] ForWind, das Zentrum für Windenergieforschung der Universitäten Hannover. <http://www.forwind.de/forwind/index.php>
- [190] ILF Beratende Ingenieure, München. <http://www.ilf.com/index.php?L=0>
- [191] Siemens Energy Transmission, Erlangen. <http://www.energy.siemens.com/entry/energy/hq/en/#428370>
- [192] Trans-European energy networks (TEN-E). http://ec.europa.eu/energy/infrastructure/tent_e/ten_e_en.htm
- [193] Bundesministerium für Wirtschaft und Technology (BMWi). <http://www.bmwi.de/>
- [194] Bird Protection Directive (V-RL: 79/409/EWG). http://ec.europa.eu/environment/nature/legislation/birds directive/index_en.htm
- [195] Boeck W., Long-term performance of SF₆ insulated systems by Task Force 15.03.07 of Working Group 15.03 on behalf of Study Committee 15, CIGRE Electra Publication, 2002.
- [196] <http://www.ptd.siemens.de/artikel0608.pdf>, Guizhou-Guangdong II August 2011.
- [197] The Friends of the Supergrid. <http://www.friendsofthesupergrid.eu/> August 2011.
- [198] The European Wind Energy Assosiation (EWEA), Annual Report 2010, <http://www.ewea.org/index.php?id=178> June 2011.
- [199] ISO 14040 Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. ISO, Geneva, Switzerland, 2006.
- [200] The European Wind Energy Assosiation (EWEA), EU Energy Policy to 2050, Achieving 80-95% emissions reductions, <http://www.ewea.org/index.php?id=178> March 2011.
- [201] Koch H., Einsatzreife erreicht, Siemens Report, Erlangen, Germany, 3/1999.
- [202] Monard D., Diplomarbeit Nr. 1820: Comparative life cycle assessment of transmission systems for offshore wind farms, TU Darmstadt, 05/2008.
- [203] Koch H., Energy transmission system with advanced technologies, World Energy Transmission Systems (WETS), Workshop Paris, France, 06/2003 <http://www.see.asso.fr/jicable/wets03/pdf/wets03-1-07.pdf>
- [204] Thuries E., Pham V.-D., Roussel P., 420 kV three-phase compressed nitrogen insulated cable, Jicable, Versailles, France, 1995.
- [205] Lequeu T., Le réseau EDF à l'épreuve des tempêtes, REE No. 2, Paris, France, 02/2000 http://www.thierry-lequeu.fr/data/REVUE_115.HTM
- [206] GIL – High Power Transmission Technology, Siemens, Brochure, Erlangen, Germany, 2010, http://www.energy.siemens.com/hq/pool/hq/power-transmission/gas-insulated-transmission-lines/GIL_e.pdf.
- [207] Miyazaki A., Yagi M., Kobayashi S., Min C., Hirotsu K., Nishima H., Development of partial discharge automated locating systme for power cable, IEEE, PES, Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Annual Report, 1998.
- [208] Okuma A., Yoshida E., Takahashi T., Hoshino T., Hikata M., Miyazaki A., Partial discharge measurement in long distance SF₆ gas insulated transmission line (GIL), ISH, 1997.
- [209] Pittroff M., Separation of SF₆/N₂ mixtures, 2nd European Conference on Industrial Electrical Equipment and Environment, pp. 61–68, Paris, France, 01/2000.
- [210] Benato R., Di Mario C., Koch H. High capability applications of Long Gas Insulated Lines in Structures, IEEE PES Transactions. on Power Delivery, Vol. 22, Issue 1, pp.619–626, January 2007.
- [211] Benato R., Paolucci A., Operating capability of ac EHV mixed lines with overhead and cables links, Electric Power System Research, Vol. 78/4, pp. 584–594, April 2008.
- [212] Benato R., Napolitano D., Reliability Assessment of EHV Gas Insulated Transmission Lines: effect of redundancies, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 23, Issue 4, pp. 2174–2181, October 2008.
- [213] Lundgaard L., Particles in GIS characterization from acoustic signatures, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 12/2001.
- [214] Hoshino T., Koyama H., Maruyama S., Hanai M., Comparison of Sensitivity Between UHF Method and IEC 60270 for Onsite Calibration in Various GIS, IEEE, PES, Transaction on Power Delivery, October 2006.
- [215] Metwally I.A., Status review on partial discharge measurement techniques in gas-insulated switchgear/lines, *Electric Power Systems Research*, 04/2002.
- [216] Benato R., Di Mario C., Lorenzoni A., Lines versus Cables: Consider All Factors, Transmission & Distribution World, Volume 59, Issue 11, (ISSN 1087-0849), pp. 26–32, November 2007.
- [217] Cookson A.-H., Garrity T.-F., Samm R., Research and development in the United States on three-conductor and UHV rated gas insulated transmission lines for heavy load transmission, Study Committee SC 21-09, CIGRE Session Paris, France, 1978.

- [218] Luxa G.-F., Boeck W., Hiesinger H., Schlicht D., Kynast E., Wiegart N. Ulrich L., Pigni A. Bargigia A., Recent research activity on the dielectric performance of SF₆, with special reference to very fast transients, Study Committee SC 15-06, CIGRE Session Paris, France, 1988.
- [219] Schoeffner G., Boeck W., Graf R., Diessner A., Attenuation of UHF-signals in GIL, ISH Bangalore, India, 08/2001.
- [220] Douglas J., Costs coming down for underground, EPRI Journal, 06/1995.
- [221] IEEE PES Tutorial, Gas-Insulated Substations, Substations Committee K2, <http://ewh.ieee.org/cmte/substations/index.htm> August 2011.
- [222] IEC 60071-5 Insulation co-ordination - Part 5: Procedures for high-voltage direct current (HVDC) converter stations, 2002-06-18.
- [223] Cheung K., Cheung S., Navin de Silvia R.G., Juvonen M., Singh R., Woo J.J., Compressed Air Energy Storage (CAES), http://www.doc.ic.ac.uk/~matti/isc2grp/energystorage_report/node7.html; Imperial College London, ISE2 2002/2003.
- [224] Cheung C.N., Heil F., Kobayashi S., Kopejtkova D., Molony T., O'Connell P., Skyberg J.P., Taillebois I., Welch I., Report on the second international survey on high voltage gas insulated Substations (GIS), CIGRE, TB 150, WG 23.02, Paris, 2000-02.
- [225] United Nations, World Economy Social Survey, Department of Economical and Social Affairs of the United Nations Secretariat, ISBN 978-92-1-109163-2 New York, 2011.
- [226] Neumann C., Gas-Insulated Lines Provide EHV Solution, Transmissio & Distribution World, 2010-02-01.
- [227] Siemens, Energy News, 2011-08-15 <http://www.energy.siemens.com/hq/de/stromuebertragung/gasisolierte-uebertragungsleitungen.htm#content=Beschreibung%20>.

本书特色

对参与地上、隧道或直埋大容量输电系统的规划、设计和建设的工程师来说，本书是基本的参考资料。本书提供了这一领域所有内容的总结，对全球范围的用户工程师、咨询工程师以及制造商都提供了完美的帮助。本书特色鲜明：

- 对运行维护提出了要求，包括修理过程、持续时间以及为达到安全可靠运行所需要的各种监测系统等；
- 过去35年间世界各地的广泛应用，以作者的专业经验通过对实际项目的描述阐述了典型的应用场合；
- 在智能电网中用于解决输电问题的可能性。

为中华崛起传播智慧

地址：北京市百万庄大街22号

邮政编码：100037

电话服务

服务咨询热线：010-88361066

读者购书热线：010-68326294

010-88379203

网络服务

机工官网：www.cmpbook.com

机工官博：weibo.com/cmp1952

金书网：www.golden-book.com

教育服务网：www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

策划编辑◎张俊红

国际电气工程先进技术译丛

- 《气体绝缘输电线路》
- 《电力电子模块设计与制造》
- 《电力系统频率鲁棒控制（原书第2版）》
- 《功率半导体器件与应用》
- 《电接触理论、应用与技术》
- 《线性神经网络控制的电力变流器与交流电气传动》
- 《切削振动和加工不稳定性控制：精密微纳加工的时频分析方法》
- 《大功率变频器及交流传动》
- 《先进的结构损伤检测理论与应用》
- 《应用于电力电子技术的变压器和电感——理论、设计与应用》
- 《电机建模、状态监测与故障诊断》
- 《风能气象学》
- 《电机传动系统控制》
- 《风力发电机组技术与应用》
- 《电动汽车技术、政策与市场》
- 《磁悬浮轴承——理论、设计及旋转机械应用》
- 《移动设备的电源管理》
- 《基于MATLAB的线性控制系统分析与设计（原书第5版）》（含1CD）



WILEY



机械工业出版社微信公众号



E视界

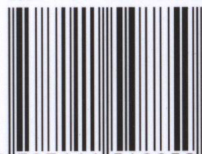
传播电类内容提升专业知识



科技电眼

关注电类行业动态 聚焦前沿科技

ISBN 978-7-111-54885-0



9 787111 548850

Copies of this book sold without a Wiley Sticker on the cover are unauthorized and illegal

上架指导 工业技术 / 电力工程 / 输电技术

ISBN 978-7-111-54885-0

定价：99.00元